



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

**Metodología para la realización de la corrección
topográfica en los estudios gravimétricos,
utilizando datos de radar y el Modelo digital de
Elevación -DEM-.**

Nardy Liliana Neiza Mora

Universidad Nacional de Colombia

Facultad Agronomía

Bogotá, Colombia

2011

Metodología para la realización de la corrección topográfica en los estudios gravimétricos, utilizando datos de radar y el Modelo digital de Elevación-DEM-.

Nardy Liliana Neiza Mora

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Geomática

Director:

Ph.D. Orlando Hernández Pardo

Línea de Investigación: Aplicaciones de Tecnologías Geoespaciales

Grupo de Investigación: Geomática-Geofísica

Universidad Nacional de Colombia

Facultad Agronomía

Bogotá, Colombia

2011

La formulación de un problema, es más importante que su solución.

Albert Einstein

Expreso mi agradecimiento a:

LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, por haberme dado la oportunidad de ser una magister y profesional especializada en Geomática.

Al profesor LUIS JOEL MARTINEZ, de la Universidad Nacional de Colombia. Director y docente del programa de la Maestría en Geomática, por su dedicación en el buen desarrollo y ejecución del posgrado.

Al Profesor ORLANDO HERNANDEZ, del departamento de Geociencias. Director del proyecto, por su colaboración en la revisión y ejecución del presente documento.

A los **PROFESORES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA** del posgrado en Geomática de la Facultad de Agronomía; Profesores de Geoestadística, de Geociencias y Geofísica de la Facultad de Ciencias.

Al Geólogo **FRANCISCO VELANDIA**, por su gran apoyo y haberme brindado la oportunidad de colaborar en el proyecto de potencial hidrogeológico en el territorio Colombiano, formando parte del grupo de trabajo, en el desarrollo de los resultados de geofísica en estas zonas.

A mi **Mama, Familiares, Amigos, Compañeros de maestría**: Andrés, Jeiner, Martha, Danny, Fernando, Oscar y Wilson por su compañerismo y gran apoyo en la terminación del plan de estudio.

Resumen

Con el fin de realizar la corrección topográfica para los estudios de gravimetría se evaluó la información de imágenes de radar y la del modelo digital de elevación del terreno (DEM) disponibles, mediante su validación y posterior generación de una imagen. Las actividades para el desarrollo del proyecto fueron: la adquisición y análisis de datos geodésicos y posprocesamiento de estaciones gravimétricas en la zona de estudio; la evaluación de la calidad de los datos ofrecidos por el modelo digital de elevación y de los datos de imágenes de radar; y, la validación de los datos de la variable de elevación en las imágenes digitales creadas con la información del sistema de posicionamiento global (GPS) de las estaciones gravimétricas tomadas en campo, mediante la aplicación de métodos geoestadístico y algoritmos de modelamiento de la superficie.

El resultado es la metodología de la corrección topográfica para los estudios de gravimetría, en la parte central del Departamento de Santander-Colombia, mediante la generación del producto de un modelo digital del terreno, validado y corregido según el uso de los receptores GPS de precisión y sus técnicas de posprocesamiento, combinado con la información de imágenes de radarsat-1 y del modelo digital de elevación – DEM- de 30m. de resolución.

Palabras clave: Corrección topográfica, Imagen Radar – RadarSat-1, -DEM- Modelos Digitales de Elevación, Gravimetría.

Abstract

In order to realize the topographic correction in the studies of gravimetry there was evaluated the information of images of radar and the Digital Model of Elevation of the area available (DEM), by means of his validation and later generation of an image. The activities for the development of the project were: the acquisition and analysis of geodesic information and postprocessing of gravimetric stations for the zone of study; the evaluation of the quality of the information offered by the digital model of elevation and of the information of images of radar; the validation of the information of the variable of elevation in the digital images created with the information of the global positioning system (GPS) of the gravimetric stations taken in field, by means of the application of methods geostatistical and algorithms of modelamiento of the surface.

The result is the terrain correction methodology for studies of gravimetry, in the central part of the Department of Santander-Colombia, by means of the generation of the product of a Digital Model of the Area, validated and corrected according to the use of the recipients GPS of precision and his technologies of postprocessing, combined with the information of images of radarsat-1 and of the digital model of elevation of the area, as the DEM of 30m. of resolution.

Keywords: Terrain Correction, Radar Image- RadarSat-1, -DEM- Digital Models of Elevation, Gravimetry.

Contenido

	Pág.
Resumen	V
Lista de figuras.....	IX
Lista de tablas	XI
Lista de Símbolos y abreviaturas.....	¡Error! Marcador no definido.
Introducción.....	1
1. Marco Teórico.....	5
1.1 Conceptos generales de gravimetría	5
1.1.1 Anomalia de Bouguer.....	6
1.1.2 Corrección del terreno (CT).....	6
■ Correcciones de terreno según Hammer.....	8
■ Correcciones de terreno según el algoritmo de Nagy	9
1.2 Datos radar proporcionados por los sensores remotos.....	13
1.2.1 Características de las imágenes Radar	14
■ Imágenes RadarSat-1	17
1.2.2 Reseña y descripción general de los Modelos Digitales de Elevación –DEM- Mundiales.....	21
■ Calidad de los datos SRTM.....	23
1.3 Procesamiento digital en la formación de modelos de superficie y mejoramiento de imágenes provenientes de sensores radar.....	26
1.3.1 Aplicación de Interferometría.....	27
1.3.2 Mejoramiento de una imagen radar.....	28
■ Supresión de Ruido –Speckle	29
■ Corrección radiométrica de las imágenes radar	30
■ Corrección geométrica y/o geocodificación de las imágenes radar ...	31
■ Sinergia de imágenes.....	31
2. Metodología	32
2.1 Descripción de la metodología.....	33
2.1.1 Adquisición de datos altimétricos y de gravedad de buena exactitud y precisión.....	33
2.1.2 Análisis estadísticos de los datos primarios (altura y gravedad) para la generación de anomalías gravimétricas.....	34
2.1.3 Análisis de los datos de altura del DEM -SRTM- de la zona de estudio y de los procesos con datos de imágenes radar.....	35

2.1.4	Validación de datos de altura con imágenes procesadas y creación de mapas de superficie	36
2.1.5	Corrección de terreno y Anomalías de Bouguer Total.....	37
2.2	Localización de la zona de estudio	37
3.	Resultados y discusiones	39
3.1	Resultados	39
3.1.1	Procedimiento en la adquisición y procesamiento de los datos geodésicos y gravimétricos.....	39
3.1.2	Análisis geoestadístico de los datos de altura y gravedad de la zona de muestreo.....	44
■	Análisis descriptivo de los datos	44
■	Análisis de estacionariedad de los datos	46
■	Análisis de normalidad de los datos.....	51
3.1.3	Análisis de los datos de altura del DEM -SRTM- de la zona de estudio y de los datos de imágenes radar	54
■	Datos de altura del DEM -SRTM- de la zona de estudio	55
■	Procesamiento digital realizado a las imágenes RadarSat-1.....	63
3.1.4	Validación de datos de altura con imágenes procesadas y creación de mapas de superficie	73
3.1.5	Corrección de terreno y Anomalías de Bouguer Total.....	82
3.2	Discusiones.....	87
4.	Conclusiones y recomendaciones	91
4.1	Conclusiones.....	91
4.2	Recomendaciones.....	93
Anexo A: Principios del sistema radar de apertura sintética –SAR		95
Anexo B: Distorsiones geométricas en una imagen Radar		99
Anexo C: Principales plataformas y sistemas de SAR espaciales existentes y sus características.....		103
Anexo D: Alcances de los Modos de haz de RadarSat, sus especificaciones y tipo de órbita.....		93
Anexo E: Características de productos Satelitales comparados con algunos productos Radar		94
Anexo F: Características de Geoposicionamiento en un sensor Radar		95
Anexo G: Metodología “típica” del procesamiento de imágenes SAR y técnicas de Interferometría – creación DEM-SRTM		97
Anexo H: Esquema de trabajo de los algoritmos Gamma-Doppler y Omega-K en sistemas SAR		98
Bibliografía		101

Lista de figuras

Pág.

Figura 1-1	Corrección de terreno según Hammer.....	9
Figura 1-2	Modelo de grilla utilizado por Oasis Montaj para la corrección topográfica .	10
Figura 1-3	Atracción gravitatoria de un prisma rectangular recto.....	11
Figura 1-4	Atracción gravitatoria de un prisma rectangular recto.....	11
Figura 1-5	Atracción gravitacional de un anillo seccional.....	12
Figura 1-6	Geometría de la interacción haz antena, haz de microondas y superficie	17
Figura 1-7	Variaciones del brillo en pixel de una imagen radar.....	18
Figura 1-8	Extensión de vacíos de los datos SRTM en Suramérica.....	25
Figura 1-9	Sesgo o follaje y canopic.....	26
Figura 1-10	Geometría de un sistema SAR interferométrico.....	28
Figura 2-1	Ciencias y procesos involucrados en la corrección topográfica en estudios gravimétricos.....	32
Figura 2-2	Localización del área referencia para la aplicación de la Metodología de la corrección de terreno o topográfica y la determinación de anomalías gravimétricas.....	38
Figura 3-1	Localización geográfica de las estaciones gravimétricas de la zona de estudio	40
Figura 3-2	Localización de bases geodésicas en la zona de Guanentina	41
Figura 3-3	Localización de bases gravimétricas	41
Figura 3-4	Adquisición y procesamiento de datos altimétricos y de gravedad en la zona de estudio.....	42
Figura 3-5	Localización de líneas y estaciones de nivelación de la Red Geodésica y Gravimétrica Nacional –Año 1998-	43
Figura 3-6	Gráficos de tendencia e histogramas de las variables altura (a) y gravedad (b)	45
Figura 3-7	Resumen de dispersiogramas	48
Figura 3-8	Gráficos 3-D de las variables altura (a) y gravedad (b).....	49
Figura 3-9	Dispersiogramas de los residuales según regresión aplicada a las variables primarias	50
Figura 3-10	Gráficos Box-Plot de las variables primarias	51
Figura 3-11	Mapas de superficie (a- modelo de interpolación RBF –m.-); y, gravedad (b- modelo IDW –mGals-)	54
Figura 3-12	Características de los datos del DEM-SRTM original del sector de la zona de estudio	55

Figura 3-13 Bloquediagrama del DEM-SRTM original mostrando la zona de estudio.....	56
Figura 3-14 Generación del óptimo mapa de superficie del DEM-SRTM.....	58
Figura 3-15 Histograma ecualizado de la imagen DEM-SRTM original de la zona de estudio	59
Figura 3-16 Procesamiento digital realizado a la imagen DEM-SRTM original en la zona de estudio	61
Figura 3-17 Diagrama de flujo de procesamiento digital y generación de mapas de superficie de la imagen DEM-SRTM original en la zona de estudio	62
Figura 3-18 Archivos CEOS de las imágenes SAR - RadarSat-1 de la zona de estudio	63
Figura 3-19 Diagrama de flujo de procesamiento digital propuesto para las imágenes RadarSat-1	65
Figura 3-20 Despliegue de la imagen RadarSat-1 - 17jan06_53271- y sus características	66
Figura 3-21 Supresión de ruido –Speckle- realizado a las imágenes referencia.....	67
Figura 3-22 Corrección radiométrica de la imagen RadarSat-1 del año 2006.....	68
Figura 3-23 Proceso de geocodificación de imágenes RadarSat-1	69
Figura 3-24 Proceso de unión de imágenes denominado Mosaico	70
Figura 3-25 Resultados de procesamiento planteado para los datos del sensor RadarSat-1 y creación de imagen para el año 2006	71
Figura 3-26 Resultados de procesamiento planteado para los datos del sensor RadarSat-1 y creación de la imagen para el año 2000.....	72
Figura 3-27 Estructuras geológicas y procesamientos digitales de imágenes ópticas y radar para el año 2000 (a) y el año 2006 (b)	74
Figura 3-28 Localización de las estaciones excluidas para la validación de los datos con diferencias mayores a $\pm 30\text{m}$ (a), entre $\pm 20\text{m}$ a $\pm 30\text{m}$ (b); y, entre $\pm 10\text{m}$ a $\pm 20\text{m}$ (c) de los datos de alturas comparadas según el DEM-SRTM y los datos de GPS.	75
Figura 3-29 Localización de las estaciones tenidas en cuenta para la validación de los datos, entre $\pm 5\text{m}$ a $\pm 10\text{m}$ (a); y, entre 0m a $\pm 5\text{m}$ izquierda y entre 0m a $\pm 1\text{m}$ derecha(b)	79
Figura3-30 Mapa de superficie corregido (a) y utilizado en la corrección de terreno o topográfica; imagen optima según $I=45-D=360-V=1$ - HE; y, zona de franja deficiente (c)	80
Figura 3-31 Procesos de modelamiento de superficie y mapa corregido utilizado para la corrección por terreno en el estudio gravimétrico de la zona en estudio	81
Figura 3-32 Mapa de Anomalías de BT modela según Kriging Simple Esférico	85
Figura 3-33 Comparación de mapas de anomalías de Bouguer Total B_T -Metodología convencional (a), Metodología propuesta (b)-	90

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1 Diagrama de flujo de procesamiento en la generación de anomalías de Bouguer Total.....	7
Tabla 1-2 Bandas de microondas y sus características	15
Tabla 1-3 Características de toma de datos en el sensor de imagen RadarSat.....	19
Tabla 1-4 Formatos de archivos CEOS (SGF, SGX y SLC).....	21
Tabla 3-1 Resumen de Análisis estadísticos de las variables de altura y gravedad.....	45
Tabla 3-2 Estadísticos de las variables altura y gravedad	46
Tabla 3-3 Resumen matriz de correlación y pruebas de Pearson.....	46
Tabla 3-4 Resultados de prueba Shapiro-Wilk.....	48
Tabla 3-5 Resumen de regresiones realizadas a las dos variables primarias	49
Tabla 3-6 Test hipótesis ANOVA realizada a las variables primarias.....	50
Tabla 3-7 Resumen de estadísticas de las variables primarias por ponderación de distancia inversa –IDW-.....	52
Tabla 3-8 Resumen de estadísticas de las variables primarias por base radial	52
Tabla 3-9 Reporte estadístico de los datos geográficos del DEM-SRTM original	57
Tabla 3-10 Resumen de los datos de texto de las imágenes RadarSat-1	64
Tabla 3-11 Conversión de nombres de archivos para importación de una imagen RadarSat-1	65
Tabla 3-12 Resumen de diferencia de alturas entre las dos fuentes para la validación de los datos.....	76
Tabla 3-13 Valores de tendencia para la variable de anomalías de Bouguer Total B_T y prueba Shapiro-Wilk.....	83
Tabla 3-14 Matriz de correlación espacial respecto a la anomalía de Bouguer Total	84
Tabla 3-15 Resumen de parámetros de semivariogramas para Kriging de los datos de anomalías de Bouguer Total -BT	84

Introducción

La información del espacio geográfico creada como imagen en un formato digital y con información altimétrica de buena precisión y exactitud es primordial para los estudios específicos de investigaciones geocientíficas, para los trabajos geofísicos y en especial para los estudios de gravimetría, es de gran importancia la información de altura (Z =elevación) con su correspondiente coordenada plana X y Y , o geográfica como su latitud (ϕ) y longitud (λ), tanto para la corrección de terreno o topográfica que se debe realizar, como para sus correcciones por altura que se deben generar en el cálculo de las anomalías gravimétricas para su interpretación. Dicha información del espacio geográfico se debe caracterizar por tener una buena exactitud posicional por lo que se debe establecer una metodología aplicando los conceptos afines a la geomática para la realización de la corrección topográfica en los estudios gravimétricos, utilizando datos y productos de sensores radar disponibles que proporcionen información para establecer un modelo de superficie terrestre.

La aplicación del método geofísico de gravimetría es complejo en regiones de relieves escarpados, debido a los efectos que ocasiona el terreno sobre los valores medidos de la gravedad. El efecto del terreno en zonas de pendientes abruptas presenta valores en miligals (mGals), que pueden enmascarar o distorsionar anomalías gravimétricas del subsuelo, con valores similares. Por lo tanto, corrigiendo los datos por efectos del terreno mediante la generación de mapas altimétricos, se puede lograr el realce o disminución

del valor del gradiente de las anomalías gravimétricas de Bouguer completa o Total $-B_T$ dependiendo de las características topográficas y geológicas de la zona de interés.

La observación y descripción del campo de gravedad y su variación temporal es considerado el problema de mayor interés en la geodesia teórica y geofísica aplicada. La dirección del campo de gravedad y la dirección vertical no son idénticas, las superficies perpendiculares a estas direcciones son superficies equipotenciales. Una de estas superficies equipotenciales (el geoide) es aquella superficie que más se aproxima al nivel medio del mar. El problema de la determinación de la figura terrestre es resuelto para un determinado momento si es conocido el campo de gravedad dentro de un sistema espacial de coordenadas. Este campo de gravedad también sufre alteraciones causadas por la rotación de la tierra y también por los movimientos de los planetas (mareas). Para una determinación del geoide, libre de hipótesis, se necesita en primer lugar de mediciones gravimétricas y observaciones por satélite. El uso de la tecnología GPS ha venido sustituyendo los métodos clásicos en la determinación de alturas geodésicas. Como consecuencia, se presentan inconvenientes relacionados con la compatibilidad de las alturas elipsoidales y las clásicas, (niveladas, ortométricas o normales) que conforman los sistemas verticales vigentes. La nivelación geodésica permite estimar la distancia existente, a lo largo de la línea de la plomada, entre la superficie topográfica y una plataforma de referencia. Por lo tanto se distinguen dos tipos de alturas: Alturas geométricas y alturas físicas. Esta clasificación obedece, principalmente, a la metodología empleada en su determinación, al modelo físico o matemático involucrado en su definición y a su aplicación práctica (Zakatov, 1981 [42]; Torge, 1983 [37]). Los datos de altimetría por satélites son ampliamente utilizados en distintos campos de investigación, en particular para la determinación de la parte de longitud de onda del campo de la gravedad y del geoide. La gran ventaja de los datos de este método es su distribución global. Esta distribución global puede ser útil para correlacionar datos referidos a distintos sistemas locales (Groten y Müller, 1990 [13]). Mediante la utilización de receptores GPS y con características específicas en cuanto a precisiones de las coordenadas obtenidas, en especial la componente vertical y su conexión a puntos de nivelación de precisión, se está aplicando las correcciones de altura y de terreno de las anomalías de Bouguer para su buena interpretación.

Los datos de coordenadas geográficas (latitud y longitud) del libro “Manual Red Gravimétrica” [5] del año de 1998, con líneas de nivelación y datos de gravimetría de primer, segundo y tercer orden para el territorio nacional no concuerda con las líneas reportadas que se encuentran actualmente sobre las vías del territorio nacional. Estos datos de coordenadas tienen un desfase significativo para el cálculo de la corrección de terreno o topográfica en un estudio de interpretación gravimétrica, ya que para realizar esta corrección es necesario tener buena exactitud posicional del sitio donde está localizado y de los datos de los puntos de nivelación de las estaciones gravimétricas. El cálculo de la corrección de altura en la generación de anomalías gravimétricas depende de las coordenadas X y Y, ya que si se tiene una altura determinada y se localiza en otro lugar diferente a esta altura, se van a generar datos equívocos para las correcciones de terreno y sus anomalías gravimétricas; por lo que si se tiene en cuenta los datos de coordenadas de la red nacional y del manual de 1998 se está fomentando y aumentando un error, al final significativo en la interpretación de datos gravimétricos, al calcular anomalías de Bouguer con correcciones de terreno o topográficas que no corresponden a la localización del dato de altura de la superficie terrestre que se está midiendo. Por lo tanto el mejoramiento de la corrección de terreno o topográfica permitirá realizar el reprocesamiento de la información gravimétrica disponible del territorio nacional, ya que en las bases de datos de dicha red se discrimina entre anomalía de Bouguer Simple y Anomalía de Bouguer Total y se puede obtener nuevas anomalías gravimétricas que habían sido subestimadas o sobreestimadas en procesamientos anteriores que han incluido una deficiente corrección por efectos del terreno. Y estas nuevas anomalías pueden generar prospectos para la exploración de minerales y recursos energéticos vitales para el desarrollo del país.

Por lo tanto se propone en la presente investigación aplicada: Desarrollar una metodología mediante la evaluación de la información altimétrica utilizando datos de radar y el modelo digital de elevación DEM-SRTM en la generación de un mapa de superficie, para la realización de la corrección de terreno o topográfica en los estudios de gravimetría terrestre implementada en la parte central del departamento de Santander-Colombia.

Para el cumplimiento de lo anterior se plantea en específico:

- ❖ Evaluar la calidad de los datos ofrecidos por el Modelo Digital de Elevación – DEM- oficial realizado para Colombia por la Agencia Espacial Estadounidense – NASA, de 30 m de resolución, además de conocer los archivos del sensor Radarsat-1 para establecer si se pueden emplear los datos altimétricos si es el caso en el sector definido como zona de estudio
- ❖ Validar la información anteriormente evaluada con la información del Sistema de Posicionamiento Global –GPS- de las estaciones gravimétricas tomadas en campo, mediante el análisis de los datos de altura y la aplicación de un método geoestadístico con los algoritmos óptimos para el modelamiento de la superficie de la zona de interés, identificando su correlación con la variable gravedad, datos primarios que se requieren para la generación de gradientes gravimétricos, según su corrección de terreno o topográfica y definición de anomalías de Bouguer Total B_T con su debida interpretación.
- ❖ Evaluar el sistema convencional y anteriormente aplicado con la metodología propuesta en el presente proyecto de tesis, mediante la comparación de los productos de los mapas de anomalías gravimétricas establecidos.

1. Marco Teórico

El marco teórico comprende temas específicos de conceptos generales de los estudios geofísicos de gravimetría, en especial de los métodos de cálculo de correcciones de terreno generados mediante mapas topográficos y/o modelos digitales de elevación con diferentes métodos y algoritmos, para el cálculo y generación de anomalías gravimétricas; explicación de datos de sensores remotos de tipo radar, dando a conocer características de los datos de RadarSat-1 y del DEM-SRTM, datos e imágenes hasta el momento recolectados para la zona de estudio propuesta; y, la explicación de los procesamiento digitales más utilizados, en la generación de mapas de superficie y para el mejoramiento de este tipo de imágenes.

1.1 Conceptos generales de gravimetría

Siguiendo a Wolfgang Torge (1989) [37] define gravimetría como la medición de la gravedad y su gradiente (variación de gravedad en una dirección) sobre o cerca de la superficie terrestre u otros cuerpos celestes. Por tanto el objeto de la gravimetría será la determinación del campo de gravitatorio de la Tierra u otros cuerpos celestes como función del espacio y el tiempo utilizando medidas de gravedad y sus gradientes llevados a cabo sobre o cerca de la superficie del cuerpo.

En el sistema internacional se utilizan m/sg^2 , pero en terminología gravimétrica se utiliza el Gal (en honor a Galileo) y sus divisores son:

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/sg}^2 = 0.01 \text{ m/sg}^2$$

$$1 \text{ mGal} = 0.001 \text{ Gal} = 0.001 \text{ cm/sg}^2 = 0.00001 \text{ m/sg}^2 = 10^{-5} \text{ m/sg}^2 \quad 1 \mu\text{Gal} = 0.001 \text{ mGal} = 0.000001$$

$$\text{Gal} = 0.000001 \text{ cm/sg}^2 = 0.00000001 \text{ m/sg}^2 = 10^{-8} \text{ m/sg}^2 \quad 1 \text{ nGal} = 0.1 \mu\text{Gal} = 10^{-9} \text{ m/sg}^2$$

Actualmente los aparatos de observación gravimétrica son capaces de observar el μGal , lo cual supone aproximadamente la 0.001 parte por millón comparada con un valor medio del campo de gravedad terrestre.

1.1.1 Anomalía de Bouguer

Para un estudio gravimétrico se calculan las anomalías de Bouguer mediante la Gravedad Teórica utilizando la formula de 1967 propuesta por Sheriff, 1984 [35].

$$G_{Teo} = 978031.846 * [1 + 0.005278895 \sin^2(\phi) + 0.000023462 * \sin^4(\phi)] \quad (1.1)$$

Donde,

G_{Teo} Gravedad Teórica en miligales (Corrección de latitud)

ϕ Latitud de la estación

La anomalía de Bouguer Simple se calcula según la siguiente expresión:

$$A_{BS} = G_a - G_{Teo} + C_{AL} - C_B \quad (1.2)$$

donde,

A_{BS} Anomalía de Bouguer Simple en miligales

G_a Gravedad Absoluta en miligales

G^{Teo} Gravedad Teórica en miligales (Corrección de latitud)

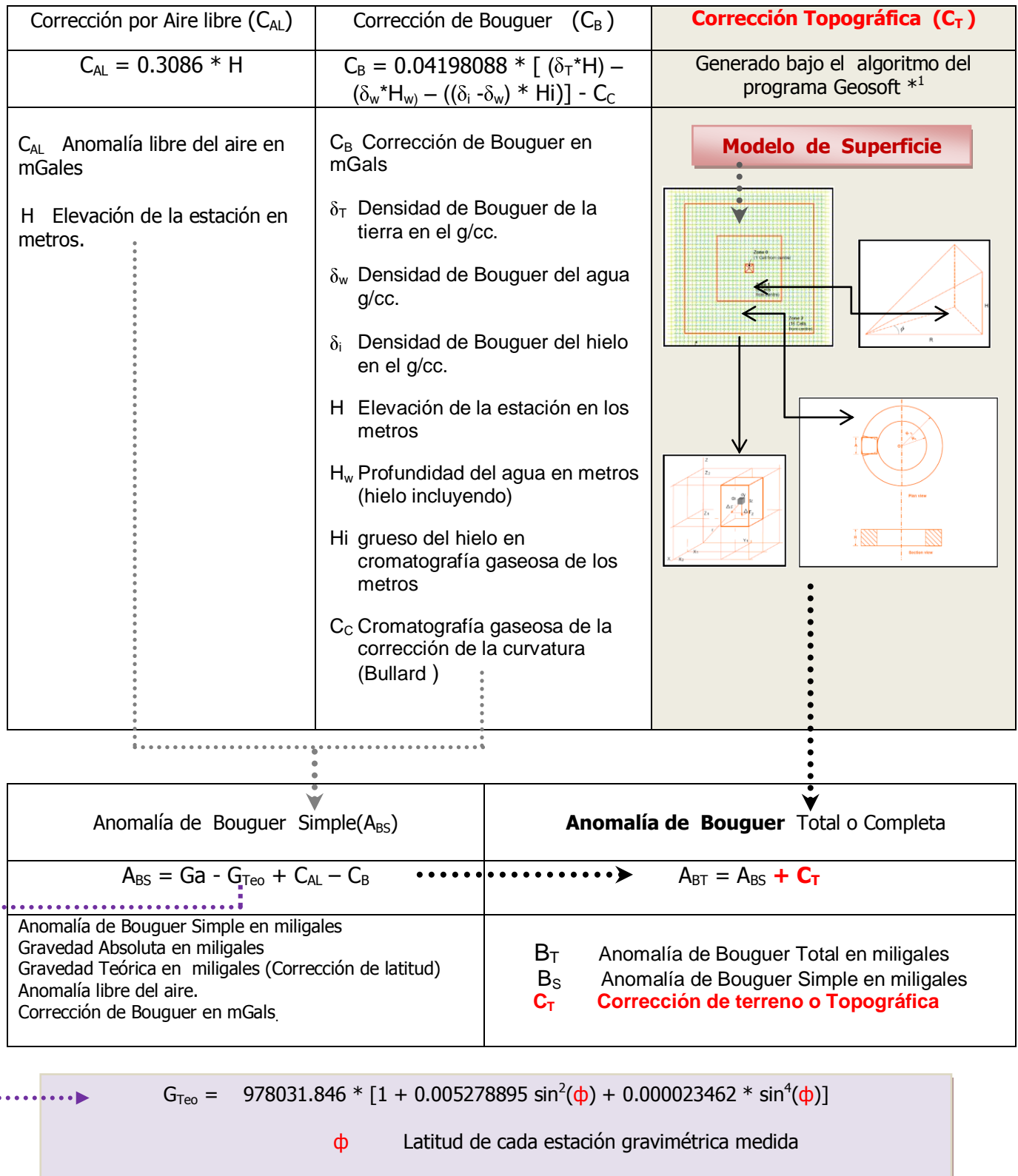
C_{AL} Anomalía del aire libre.

C_B Corrección de Bouguer en mGals.

Se realizan correcciones para el cálculo la Anomalía de Bouguer Total como: Corrección por Aire libre (C_{AL}); Corrección de Bouguer (C_B); y, Corrección de terreno o Topográfica (C_T).

1.1.2 Corrección del terreno (CT)

Un científico destacado por la intensidad de su trabajo dentro del campo de la gravimetría es Hammer, del cual ha llegado hasta nuestros días la corrección de terreno mediante una serie de tablas que llevan su nombre. Hammer supo enfocar el problema inverso con una practicidad elevada y sin pérdida de rigor científico. Mediante la aplicación práctica del teorema de Gauss, estableció algoritmos para la estimación de masas enterradas (Hammer, 1945) [16-b] y prácticos constreñimientos para el cálculo del problema inverso (Hammer, 1963) [16-c]. También realizó importantes contribuciones en el problema directo.

Tabla 1-1 Diagrama de flujo de procesamiento en la generación de anomalías de Bouguer Total

■ Correcciones de terreno según Hammer

Las primeras correcciones del terreno son basadas en el sistema de Hammer que dividen el terreno que rodea una estación de la gravedad en zonas y compartimientos iguales del área. Las elevaciones medias para cada compartimiento estaban manualmente estimado de los mapas topográficos de la escala más grande disponibles, las correcciones del terreno entonces eran calculadas basadas en la elevación media estimadas de cada compartimiento.

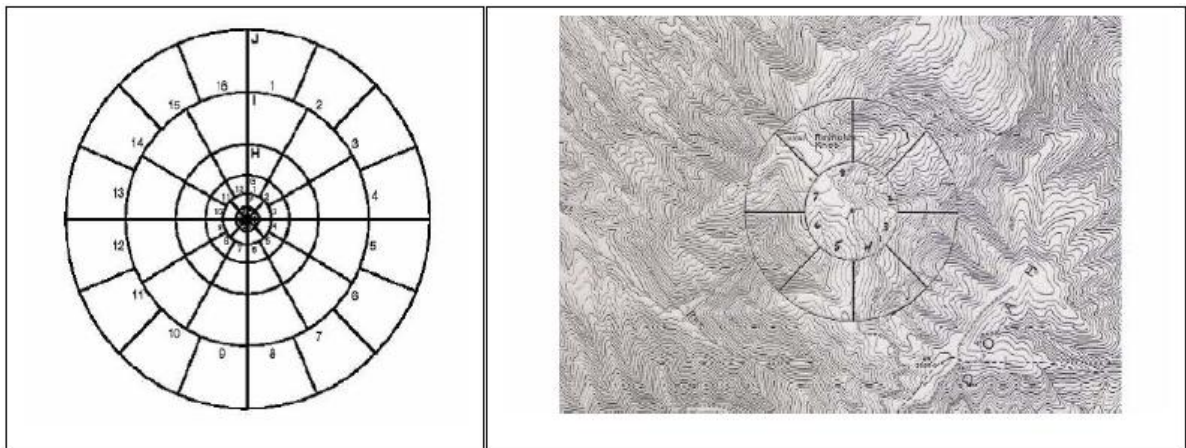
El método clásico de las correcciones del terreno se realizan usando un circular ocular cuadrículado dividido por las líneas radiales y concéntricas en una gran cantidad de compartimientos (Figura 1-1). La zona exterior extiende a casi 22 km, más allá de los cuales los efectos topográficos son generalmente insignificantes. El círculo ocular cuadrículado se pone en un mapa topográfico con su centro en la estación de la gravedad y la elevación topográfica media de cada compartimiento se determina. La elevación de la estación de la gravedad se resta de estos valores, y del efecto gravitacional de un sector de un cilindro vertical en su eje. La corrección del terreno entonces es sumada a la contribución gravitacional de todos los compartimientos. La corrección del terreno es la una operación en la reducción de la gravedad que no puede ser automatizada completamente (Kearey, P et al 1991) [21].

La corrección de terreno o topográfica (CT) en los estudios de gravimetría se ha venido realizando mediante la ayuda de la aplicación terrain correction del modulo Gravity del programa Geosoft, utilizando un mapa en una grilla generada en .grd de la imagen Radar de la Nasa. Geosoft calcula las correcciones del terreno usando una combinación del método descrito por Nagy (1966) [29] y Kane (1962) [19]. Para calcular las correcciones, los datos del DEM se muestran en una rejilla centrada en la estación que se calculará. Se calcula la corrección con base en la zona cercana, zona intermedia y contribuciones lejanas de la zona. En la zona cercana el algoritmo suma los efectos de cuatro secciones triangulares que se inclinan, los cuales describen una superficie entre la estación de la gravedad y la elevación en cada esquina diagonal. En las zonas intermedias (1 a 8), el efecto del terreno se calcula para cada punto usando el acercamiento cuadrado del plano del prisma de Nagy (1966) [29]. En la zona lejana deriva el efecto del terreno basado en

la aproximación anular del segmento del anillo a un prisma cuadrado según lo descrito por Kane (1962) [19].

El cálculo de la corrección de terreno se lleva de la distancia local hasta la distancia externa especificada de la corrección. El propósito de la corrección de la curvatura en la anomalía de Bouguer es convertir la geometría para la corrección de Bouguer de una losa infinita a un casquillo esférico del espesor igual a la elevación de la estación y de radio (longitud del arco) que sea 166.735 kilómetros. La corrección de la curvatura depende de la elevación de la estación (E.g. 1.1 mGal en 1000 m, 1.5 mGal en 2000 m, 1.2 mGal en 3000 m, 0.2 mGal en 4000 m, -1.5 en 5000 m y el - 3.9 en 6000 m), y la latitud (que se extiende en docenas de microgales).

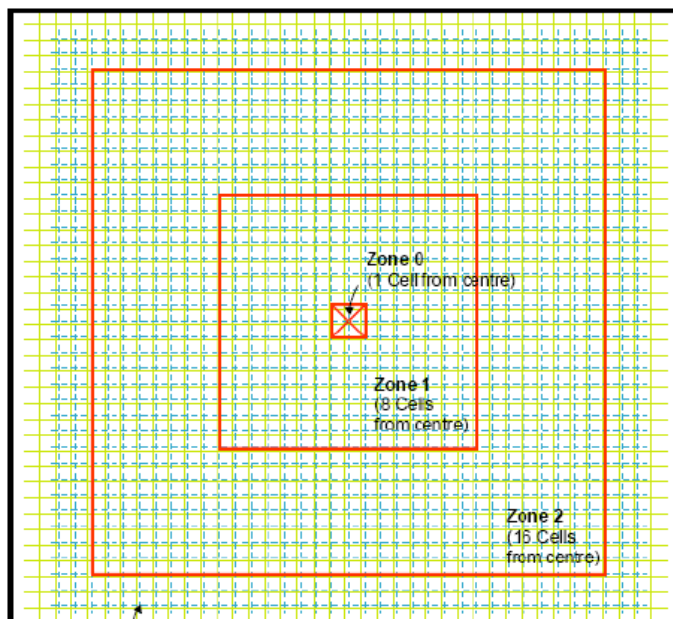
Figura 1-1 Corrección de terreno según Hammer



■ Correcciones de terreno según el algoritmo de Nagy

Este método de corrección de algoritmo según Nagy, lo utiliza el programa especializado Oasis Montaj v. 6.4.2.- Geosoft. La corrección de curvatura corresponde a la formula de LaFehr, T.R. (1991) [23]. El programa Oasis Montaj (geosoft Inc. 2007) para calcular la corrección topográfica local, muestrea los datos del DEM local en un mallado uniforme centrado en cada una de las estaciones existentes, así como se muestra en la Figura 1-2.

Figura 1-2 Modelo de grilla utilizado por Oasis Montaj para la corrección topográfica



Como se observa en la figura anterior se observan tres (3) zonas para el cálculo de esta corrección, las cuales se explican a continuación:

- **Zona 0: Triángulo**

Para esta zona cercana el algoritmo suma los efectos de cuatro gradientes de secciones triangulares, que se encuentran dentro del cuadrado que forma la zona 0 (Figura 1-3). Estas secciones describen la superficie entre la sección y la elevación de cada esquina diagonal y se calcula según la siguiente ecuación formulada por Kanne (1962) [19]:

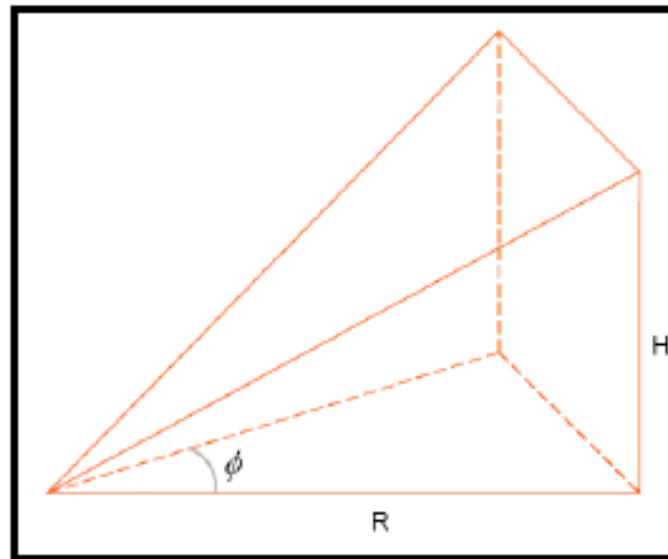
$$g = GD\phi \cdot \left(R - \sqrt{R^2 + H^2} + \frac{H^2}{\sqrt{R^2 + H^2}} \right) \quad (1.3)$$

Donde,

g es la atracción gravitatoria

G es la constante de la Gravedad

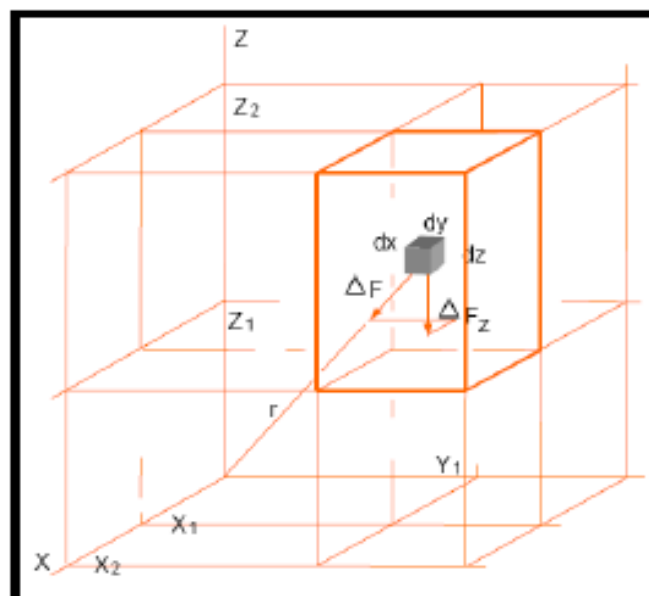
D es la densidad

Figura 1-3 Atracción gravitatoria de un prisma rectangular recto

- **Zona 1: Prisma**

Para esta zona intermedia (Figura 1-4) se calcula la corrección topográfica utilizando la fórmula empleada por Nagy (1966) [29]:

$$g = -GD \left| \frac{Z_2}{Z_1} \right| \left| \frac{Y_2}{Y_1} \right| \left| \frac{X_2}{X_1} \right| x \cdot \ln(y + R) + y \cdot \ln(x + R) + (Z \arctan Z \cdot R/x \cdot y) \Bigg| \Bigg|_{(1.4)}$$

Figura 1-4 Atracción gravitatoria de un prisma rectangular recto

- **Zona 2: Anillo seccional**

Para esta zona lejana (Figura 1-5) la corrección topográfica se calcula por medio de la formula descrita por Kane (1962) [19], la cual se basa en la aproximación del segmento de un anillo seccional a un prisma cuadrado, utilizando la siguiente fórmula:

$$g = 2GDA^2 \frac{(R_2 - R_1 \sqrt{R_1^2 + H^2} - \sqrt{R_2^2 + H^2})}{(R_2^2 - R_1^2)} \quad (1.5)$$

Donde,

g es la atracción gravitatoria

G es la constante de la Gravedad

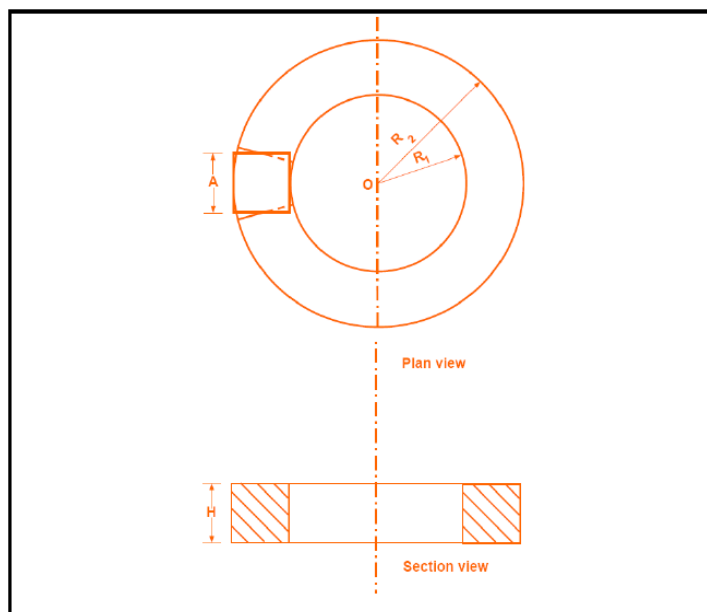
D es la densidad

H es la altura del anillo o prisma

A es la longitud del lado horizontal del prisma R_1 es el radio interno del círculo de la sección del anillo

R_2 es el radio externo del círculo de la sección del anillo

Figura 1-5 Atracción gravitacional de un anillo seccional



1.2 Datos radar proporcionados por los sensores remotos

En la selección de sensores e imágenes de satélite para la realización del presente proyecto se escogió las imágenes provenientes de radar ya que el sistema puede adquirir datos de altura de la superficie terrestre para la producción de un DEM (Modelo Digital de Elevación). Las imágenes de radar son las primeras en representar y dar a conocer los datos de la superficie en el trópico, han sido una de las mejores opciones para generar DEM en estas zonas, por lo tanto se puede reproducir un buen mapa-imagen altimétrico, requerido para la corrección topográfica en los estudios geofísicos denominados gravimétricos. Se trabajo con las imágenes de los DEM's de la zona central para Colombia, generados con métodos interferométricos (inSaR) trabajados por la Agencia Espacial Estadounidense –NASA- a partir de datos Radar SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) de 30 metros de resolución. Con los anteriores tipos de imagen satelital se realizo la corrección topográfica en el estudio de gravimetría empleada en la parte Central del Departamento de Santander; ya que hasta el momento son los productos imagen con datos altimétricos oficiales provenientes de datos satelitales en el territorio Colombiano y no han sido evaluados para ser utilizados en estudios específicos como son los geofísicos.

Las imágenes obtenidas de un radar (SAR) son muy sensibles a las ondulaciones del terreno, y esta sensibilidad han sido la base para el desarrollo de varias técnicas relevación-traza usando una o varia imágenes del radar, a saber, radarmetría, interferometría y radarclinometria (Polidori, 1992) [32]. Cada una de estas técnicas fue propuesta inicialmente hace más de 25 años, y sus bases teóricas fueron establecidas en los años 80. El estado plus ultra de traza del radar ha sido presentado detalladamente por Leberl,1990) [24], basado en campañas aerotransportadas (1978), SIR-A (1981) y SIR-B (1984), pero el potencial real de las técnicas de radar se ha sabido solamente por algunos años, debido a la carencia de los datos del SAR antes de los años 90. El lanzamiento de varios SARs, estos últimos años (ERS, JER-S, RADARSAT, SIR-C) ha conducido a otros experimentos y a una valoración mejor de la exactitud de DEM's (Modelos Digitales de Superficies).


1.2.1 Características de las imágenes Radar

La palabra radar viene de la traducción Radio Detection And Range, que significa “detección y medida de distancias por ondas de radio”. Una imagen radar se forma básicamente a través de la medida de los pulsos retrodispersados provenientes de la escena de interés, la cual es iluminada por un haz de radiación coherente en alguna de las bandas (Lira, J. 2009) [25]. Una antena radar emite ondas en la región de las microondas en dirección perpendicular a su eje, las cuales son dispersadas en la superficie terrestre; en seguida la parte del pulso que es dispersada por el terreno en la dirección de la antena es recibida por la misma. Luego en función del tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción de los pulsos, se logra la obtención de puntos situados a diferentes distancias de la antena, y son ordenados de tal forma que posteriormente configuren una imagen-radar. Por lo general un sistema de radar posee tres funciones primarias:

- Emite señales de microondas (en sus principios fueron de radio, de ahí su nombre) hacia una escena.
- Recibe la fracción de energía reflejada por la escena en su misma dirección.
- Observa la intensidad (detección) y el retardo de tiempo (distancia) de las señales o eco de retorno.
- Banda X: Utiliza una escala de longitudes de onda desde 2.4 a 3.8 cm. (8 a 12.5 GHz), se emplea ampliamente para reconocimiento militar y comercialmente para levantamientos topográficos, y se usa en el radar aerotransportado del CCRS (Canadian Centre for Remote Sensing).
- Banda C: Utiliza una gama de longitudes de onda desde 3.8 a 7.5 cm. (4-8 GHz) y se usa en muchos SAR a bordo de naves espaciales tales como ERS-1 y RADARSAT.
- Banda S: Utiliza una gama de longitudes de onda desde 7.5 a 15 cm. (2-4 GHz) y se usa en los radares Almaz.
- Banda L: Utiliza una gama de longitudes de onda desde 15 a 30 cm. (1-2 GHz) y se usa en los radares SEASAT y JERS-1.
- Banda P: Utiliza una gama de longitudes de onda desde 75 a 133 cm. (225-400 MHz) y se usa en JAPAirSAR de la NASA

La denominación de las bandas de microondas (Tabla 1-2) están dadas por:

Tabla 1-2 Bandas de microondas y sus características

Identificador de Banda	Rango de Frecuencia	Aplicación
HF	3 -30 MHz	Vigilancia OTH
VHF	30 - 300 MHz	Vigilancia a muy largo alcance
UHF	300 - 1000 MHz	Vigilancia a muy largo alcance
L	1 - 2 GHz	Vigilancia a largo alcance - Control de tráfico aéreo (ruta)
S	2 - 4 GHz	Vigilancia a medio alcance - Control de tráfico (terminal) y Meteorología a largo alcance
 C	4 - 8 GHz	Seguimiento a largo alcance - Meteorología (a bordo de aviones)
X	8 - 12 GHz	Seguimiento a corto alcance - Guiado de misiles - Mapas y Radares marinos
Ku	12 - 18 GHz	Mapas de alta resolución - Altimetría en satélites
K	18 - 27 GHz	Poco uso - (absorción del vapor de agua)
Ka	27 - 40 GHz	Mapas de muy alta resolución - Vigilancia de aeropuertos
Milimétricas	40 - 100+ GHz	Experimental

El diseño de un sistema SAR (Anexo A) está realizado con base en el desplazamiento relativo entre la antena y un punto dado en la escena, se mide la variación de rango y el corrimiento doppler para un intervalo acotado de la dirección Y. Durante un cierto intervalo de tiempo Δ_t y debido al ancho finito del haz y al movimiento relativo entre la escena y la antena, se produce una variación del rango y del corrimiento doppler para cada punto de la escena observado a lo largo de la dirección Y. Esta historia de rangos y corrimientos doppler es medida y registrada por el sistema radar durante el proceso de generación de una imagen. En la generación de los datos para conformar una imagen de radar de una escena, tanto el rango como el corrimiento doppler se encuentran almacenados en sendos vectores que describen la variación de rango y frecuencia doppler durante la observación de un área en la escena a lo largo de la proyección del haz sobre el terreno (Lira J, 2009) [25]. El radar, siendo un sistema activo, controla su propia fuente de radiación con la que genera un tren de pulsos que interaccionan con los elementos de la escena. Para formar la imagen, el sistema radar mide las historias de rangos y de corrimiento doppler, a partir de las cuales se construye un sistema de

coordenadas oblicuo en cuyos nodos se posicionan los píxeles de la imagen. Esta manera de generar imágenes produce una serie de distorsiones y particularidades geométricas que requieren de estudio y corrección. Estas distorsiones se conocen como fenómenos de sombras, escorzos e inversión de relieve (Anexo B).

En la localización de los puntos de la escena sobre la imagen radar existen dos posibles representaciones, una llamada representación en el rango de inclinación y la otra representación en el rango sobre el terreno. En la primera de éstas, los puntos de la escena son colocados de acuerdo con la proyección de los rangos (Lira J, 2009) sobre una línea paralela al datum. En la segunda de éstas, los puntos son colocados de acuerdo con la intersección de los rangos con el datum. La localización en el terreno de un campo instantáneo de vista (CIV) está determinada en una imagen radar por la medida simultánea de rango y del corrimiento doppler (Lira J, 2009) [25]. De la antena al terreno existe una colección de puntos con el mismo rango (círculos) pero diferente corrimiento doppler, similarmente, existe una colección de puntos con el mismo corrimiento doppler pero diferente rango. Para localizar un CIV unívocamente, es necesario encontrar la intersección de las líneas de puntos de mismo rango (equidistancia) con aquellas líneas de mismo corrimiento doppler (isodoppler). El sistema de coordenadas al que se refiere una imagen radar es, por tanto, un sistema oblicuo formado por círculos e hipérbolas. El lugar geométrico donde se intersecan círculos e hipérbolas es el conjunto de los nodos donde se encuentran los centros de los campos instantáneos de vista de la escena observada. El valor de los píxeles de la imagen radar es el valor de la señal registrada por la antena.

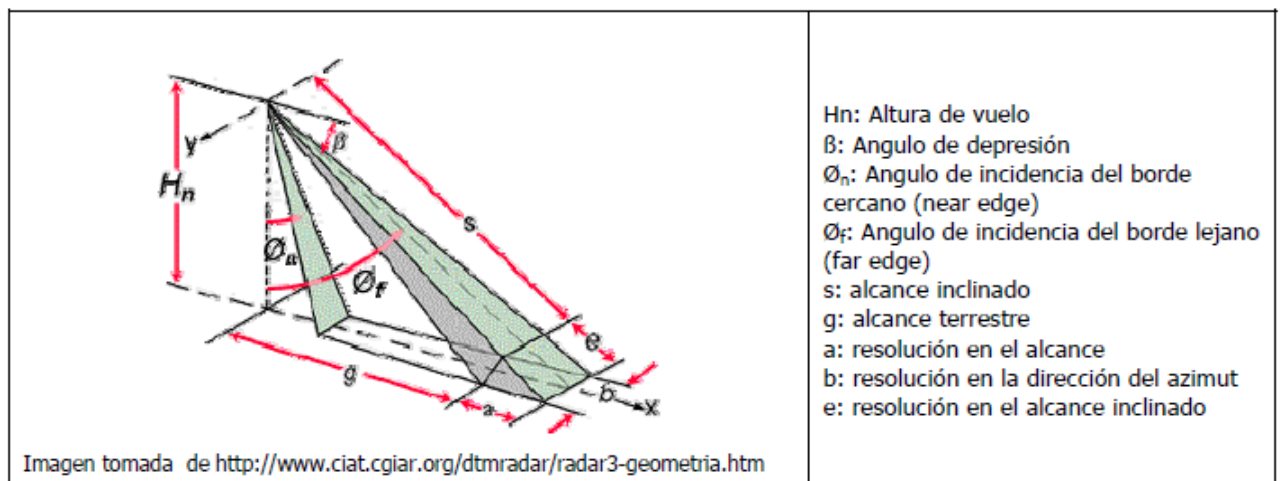
El Radar de Apertura Sintética (SAR, Synthetic Aperture Radar) opera mediante el efecto físico de Dopper ayudando a la observación realizada cuando hay un movimiento relativo entre el objeto y el sensor, y a su resolución espacial. El sistema SAR, registra los pulsos de un mismo objeto en la superficie en momentos distintos de la trayectoria del sensor, es un sistema de iluminación lateral que origina una imagen de la superficie terrestre. Su movimiento a lo largo de su trayectoria provoca que el Radar ilumine hacia el lado de la dirección de vuelo, originando franjas continuas y paralelas entre sí, de la superficie en observación, registrando la información de las microondas que se reflejan. Esta señal registrada se graba a bordo del sensor, la cual se procesa apropiadamente para formar una imagen digital. Sin embargo la formación de esta imagen es distinta, tanto en la dirección paralela a la trayectoria del movimiento (azimut) y

perpendicularmente a este (profundidad o alcance). El primer SAR espacial civil fue el SEASAT de E.U., lanzado en 1978, seguido por el Almaz (U.R.S.S./Rusia), el ERS-1 (Europa), el J-ERS-1 (Japón), el ERS-2 (Europa) y el RADARSAT-1 (Canadá).

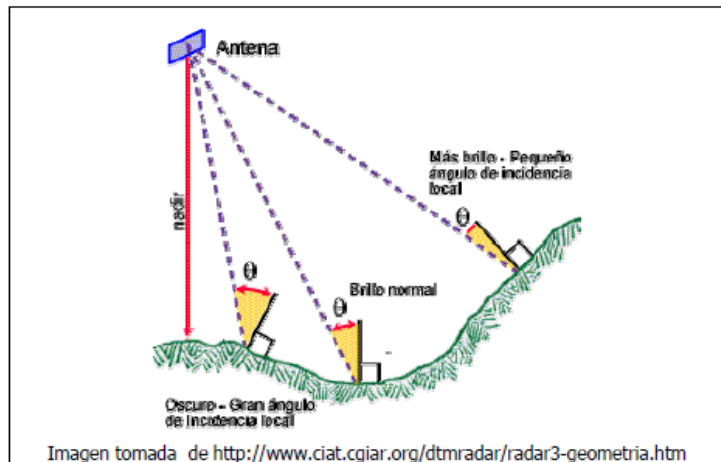
■ Geometría de imagen de radar

Para interpretar una imagen de radar es importante conocer algunos aspectos geométricos (Figura 1-6) que existen entre el haz energético incidente con la superficie del terreno y de las distorsiones que se observa en la imagen. El ángulo de incidencia describe la relación entre la iluminación del radar y la superficie de tierra. Específicamente, es el ángulo entre el rayo del radar y un objeto en la superficie. El ángulo de incidencia ayuda a determinar el aspecto de un objeto en la imagen. Debido a su mayor altitud, los ángulos de incidencia de los satélites varían menos que los ángulos de incidencia de sistemas aerotransportados. Esto conduce a una iluminación más uniforme en imágenes de satélite que en imágenes de radar aerotransportadas. Un ángulo incidencia local se puede determinar para cualquier pixel en una imagen. Los árboles, las rocas, los edificios, otras estructuras y diversos terrenos crean cambios en el ángulo de incidencia local. Esto cambios causan variaciones en brillo del pixel (Figura 1-7).

Figura 1-6 Geometría de la interacción haz antenna, haz de microondas y superficie



H_n : Altura de vuelo
 β : Angulo de depresión
 Θ_n : Angulo de incidencia del borde cercano (near edge)
 Θ_f : Angulo de incidencia del borde lejano (far edge)
 s : alcance inclinado
 g : alcance terrestre
 a : resolución en el alcance
 b : resolución en la dirección del azimut
 e : resolución en el alcance inclinado

Figura 1-7 Variaciones del brillo en pixel de una imagen radar

Los sistemas de proyección de imagen radar registran las diferencias en tiempos de desplazamiento entre el envío de la señal y su retorno. La distancia entre el objeto y la antena es igual a la velocidad de la propagación de la longitud de onda a través de la atmósfera multiplicada por el tiempo que le lleve alcanzar la antena, siendo la relación entre la velocidad de la radiación del espectro electromagnético, el tiempo requerido y la distancia viajada. Existe una relación directa entre el alcance inclinado y el alcance terrestre, si se conocen los ángulos en que las microondas se propagan, podemos utilizar la trigonometría para calcular el alcance terrestre.



Para ver una imagen de radar en una configuración de alcance terrestre más reconocible, se debe realizar una corrección geométrica entre las dos distancias. La distorsión de alcance inclinado a alcance terrestre se pronuncia mucho más en sistemas aerotransportados SAR que en sistemas basados en satélites SAR. Esto es resultado de la diferencia en ángulos de depresión entre los sistemas aerotransportados y los satélites SARs. La corrección de alcance inclinado a alcance terrestre puede no ser necesaria para crear un efectivo par estéreo a partir de imágenes SAR. Cuatro características de la relación geométrica entre el sensor y el terreno que son únicas para las imágenes del radar son:

- Acortamiento de la pendiente
- Pseudo sombreado
- Inversión del relieve
- Sombreado

■ Imágenes RadarSat-1

En el Anexo C se presenta un resumen de las características de los sistemas SAR Espaciales existentes y el utilizado en este proyecto. El sensor utilizado en este proyecto fue RadarSat-1, que contiene siete modos de haz para la obtención de imágenes con resoluciones que van desde los 8 hasta los 100 metros. El haz puede direccionarse en ángulos desde 10 a 60 grados, barriendo áreas cuyo ancho va desde 50 a 500 km. (Anexo D). Esto permite obtener mapas a escalas de 1:1.000.000 a 1:50.000. Para el conocimiento de los datos de RadarSat-1 se familiarizo con el modo de toma de los sensores RadarSat (Tabla 1-3), las clases de productos y los formatos originales para la debida importación de datos radar y poder hacer las aplicaciones respectivas de correcciones y obtener imágenes-radar de la zona de interés, que para el mayor entendimiento se explica, en el Anexo E, las características de los productos de radar procesados por los diferentes SaR espaciales y su comparación con otros productos de imágenes ópticas satelitales.

Tabla 1-3 Características de toma de datos en el sensor de imagen RadarSat

MODE	RESOLUTION (m) Range 1 x azimuth (m)	LOOKS 2	WIDTH (km)	INCIDENCE ANGLE 3 (degrees)
 Standard	25 x 28	4	100	20-49
Wide - 1	48-30 x 28	4	165	20 - 31
 Wide - 2	32-25 x 28	4	150	31 - 39
Fine resolution	11-9 x 9	1	45	37 - 48
ScanSAR narrow	50 x 50	2 - 4	305	20 - 40
ScanSAR wide	100 x 100	4 - 8	510	20 - 49
Extended (H)	22-19 x 28	4	75	50 - 60
Extended (L)	63-28 x 28	4	170	10 - 23

1. Nominal, la resolución de alcance sobre el terreno varía con el Rango

2. Nominal, rango y procesador son dependientes

3. Ángulo de incidencia depende de modo secundario

Fuente <http://www.crisp.nus.edu.sg/~research/tutorial/radarsat.htm>

En específico los productos de RadarSat-1 para esta zona de interés son de Georeferencia de Resolución Fina denominados “SGF”, que tienen un nivel base de procesamiento desde la casa matriz. Los datos de la señal Radar son datos del eco que recibe el radar, en términos de fase y cuadratura (I/Q); están dados en función del alcance, sin información del formato de telemetría, reorganizados en líneas contiguas a lo largo del alcance del radar; y No son una imagen, debe aplicarse un procesador SAR para obtener la imagen como producto. La especificación de formatos para el manejo de los datos SaR se realiza mediante archivos CEOS (siglas en inglés del Comité sobre los Satélites para la Observación de la Tierra), organismo internacional dedicado a diversos aspectos relativos a la Observación de la Tierra (EO).

Por su parte, el Committee on Earth Observation Satellites (CEOS) es reconocido como el ente regulador del componente espacial del GEOSS y coordina las observaciones espaciales de la tierra. De CEOS hacen parte 28 agencias especiales y 20 organizaciones nacionales e internacionales, que buscan mejorar la coordinación internacional, el intercambio de datos y optimizar el beneficio para la sociedad. CEOS es reconocido como el foro internacional más grande para la coordinación de los programas de satélite de observación de la tierra y por la interacción de estos programas con usuarios de datos satelitales a nivel mundial.

CEOS es un formato de definición propia, por lo tanto, existen muchas variantes menores entre los productos de formato CEO. Los formatos CEOS en RADARSAT contienen 5 archivos y un archivo texto (Tabla 1-4), de los cuales sólo uno contiene los datos de la imagen. Los 4 restantes contienen información sobre esos datos que constituyen la imagen. En la Tabla 1-4 se proporciona un compendio de la estructura del formato de archivos CEOS para datos de RADARSAT.

Tabla 1-4 Formatos de archivos CEOS (SGF, SGX y SLC)

1.2.2 Reseña y descripción general de los Modelos Digitales de Elevación –DEM- Mundiales

Las fuentes de datos de elevación digital y de creación de DEM's a nivel mundial y en ejecución son:

- ✓ ASTER G-DEM
- ✓ ALOS PRISM
- ✓ Productos mejorados GTOPO de USGS
- ✓ Productos derivados del SRTM HydroSHEDS de la WWF

El producto ASTER G-DEM que fue lanzado a finales del 2009 es un DEM de 1 arco-segundo (más o menos 30 m) de resolución y cualidades similares al SRTM (ERSDAC, 2008). Aunque La validación final de los datos aún no ha culminado, el DEM está diseñado para una exactitud de ± 7 metros, muy parecido al SRTM. Una vez concluida la validación el DEM quedará a la disposición para ser descargado por el público. Las imágenes del Advanced Land Observing Satellite (ALOS -RESTEC -Remote Sensing Technology Center of Japan- 2008) [33] y del Sensor Remoto Pancromático para

estéreo-planimetría (PRISM) son operadas por la Agencia de Exploración Aeroespacial Japonesa (JAXA). Estos productos DEM son de alta resolución a 10 m, e igual que el SRTM capta elevaciones de superficie (Gruen & Wolff 2007) [14]. Por su alta resolución y por el costo de desarrollo del producto, estos datos serían de mayor utilidad para aplicaciones en regiones geográficas de poca extensión.

Es posible adquirir en el mercado un DEM de alta resolución para Sudamérica, pero el costo es muy elevado. Un DEM regional para América del Sur procesado con imágenes SPOT costaría aproximadamente US\$ 61,4 millones, y un DEM construido con imágenes ALOS costaría alrededor de US\$ 30 millones.

Hasta el lanzamiento del DEM SRTM de 90 m en el 2003, el DEM GTOPO 30 del USGS fue el mejor DEM disponible para Sudamérica, con una resolución de 1 km. El USGS desarrollará una nueva serie de productos GTOPO que tendrá como base el DEM SRTM de 30 m. Estos productos incluyen: elevación mínima, elevación máxima, elevación media, desviación típica de elevación, submuestreo sistemático y línea divisoria de aguas y se ofrecerán a tres resoluciones: 30 arco-segundos (± 1 km), 15 arco-segundos (± 500 m), y 7,5 arco-segundos (± 250 m) (Danielson & Gesch, 2008) [3]. Esta serie de productos permitirá procesar datos eficientemente para aplicaciones a escala regional y continental. Un ejemplo importante de esto sería la extracción de hoyas hidrográficas y enrutamiento de ríos virtuales superficiales utilizando el producto de “énfasis por línea de quiebre” (Danielson & Gesch, 2008) [3]. Este producto mantiene las elevaciones mínimas y máximas de la topografía del paisaje con lo que se obtiene un método eficiente para desarrollar derivadas hidrológicas tales como cuencas colectoras -hoyas hidrográficas, (Danielson & Gesch, 2008) [3], ofrece evidencia de su efectividad en una concordancia espacial superior a 97% en la delineación de límites entre hoyas hidrográficas producida con los datos de elevación del EDNA (Derivadas de Elevación de 30m. para Aplicaciones Nacionales) (<http://edna.usgs.gov/>) y los datos de énfasis por línea de quiebre de 7,5 arco-segundos (Danielson & Gesch, 2008) [3]

Con respecto a los productos HydroSHEDS de la WWF, fueron desarrollados con base al mismo concepto de construir un DEM sin costo alguno para todo el continente que facilita el desarrollo de datos espaciales consistentes y de alta calidad para el análisis. Los productos incluidos en la secuencia HydroSHEDS son el DEM con vacíos rellenos

SRTM de 90m, el DEM hidrológicamente condicionado, dirección del drenaje, acumulación de caudal, redes fluviales y cuencas de drenaje (USGS, 2008) [38]. Estos productos vienen en resoluciones espaciales y tipos de datos diversos.

En febrero del 2000 la NASA, la Agencia Nacional de Inteligencia Geo-Espacial (NGA), y las Agencias Espaciales de Alemania y de Italia lanzaron la Misión SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Esta misión produjo el modelo de elevación digital (DEM) de más alta resolución de la superficie terrestre (Farr, 2007) [6]. Este DEM fue producido a una resolución de 1 arco-segundo (aproximadamente 30 m en el Ecuador) para casi todo el globo terráqueo, entre las latitudes 60 grados norte y 56 grados sur (Farr, 2007) con un error de altitud vertical medio de 6,2 m (nivel de confianza de 90%) y un error de geoubicación de 9m. para Suramérica (Rodríguez, 2005) [34]. En 2003 la NASA publicó los productos DEM en el portal web del Earth Resources Observation and Science (EROS) (Centro de Observación y Ciencia de los Recursos de la Tierra). Dos de los productos notables derivados del DEM global son los productos HydroSHEDS del World Wildlife Fund (WWF); (Grohman, 2006) [12] y el modelo de elevación global mejorado de USGS. Ambos productos se dirigen bajo HydroSHEDS, que presenta una secuencia de datos a escala regional para modelaje hidrológico y la elevación global mejorada de USGS es una colección de productos de elevación a escala global y continental (Danielson & Gesch, 2008) [3].

■ Calidad de los datos SRTM

El SRTM se realizó mediante la técnica interferométrica para procesar los datos topográficos (NASA, 2005) [28]. En pocas palabras, la interferometría recoge dos imágenes de la misma ubicación en distintas posiciones de ventaja (NASA, 2005) [28]. Cuando se comparan las dos imágenes se aprecia una ligera diferencia en los valores de las mismas y a partir de esa diferencia se puede calcular la topografía de la superficie terrestre (NASA, 2005) [28].

Las imágenes interferométricas fueron producidas por dos sistemas radar de apertura sintética: banda-C (SIR-C) y banda-X (X-SAR). El SRTM fue diseñado con umbrales de precisión cartográfica para ayudar a asegurar un conjunto de datos topográficos globales exactos y consistentes. El requisito de precisión horizontal de la misión fue menor de 20

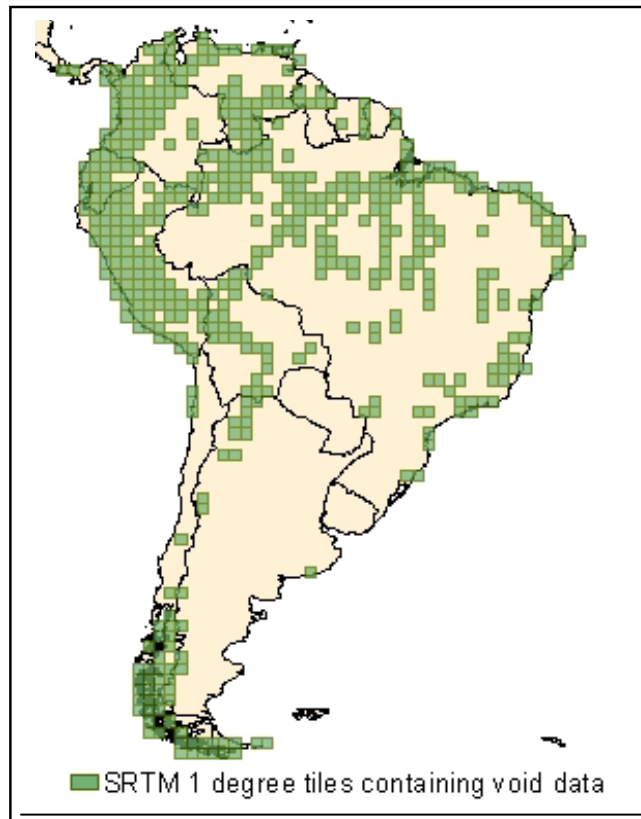
m, considerándose un error de altura absoluta de 90% a 16 m. (Hofman, 2006) [17]. Para el continente Sudamericano el conjunto de datos SRTM tiene un error horizontal promedio de 9,0 m y un error vertical absoluto (altura) promedio de 6,2 m (Rodríguez, 2006). América del Sur ha visto una mejoría de 10 veces (tanto en resolución espacial como en exactitud vertical) con la aparición del DEM de 90m comparado al último DEM continental, el GTOPO30 del USGS (Gesch, 1999) [10]. Una propiedad importante del conjunto de datos SRTM es su precisión espacial, con error de altura vertical y error horizontal globales promedio de 7 y 10 metros respectivamente (Rodríguez, 2005) [34]. El algoritmo HAND (Altura por Encima del Drenaje más Cercano), reconoce las correlaciones entre altura del follaje y su red de drenaje más cercana como buena descripción del terreno, y en la Amazonia se utilizó para asistir en la medición del potencial de drenaje del suelo (Renno, 2008) [32].

El SRTM tuvo en cuenta los vacíos de datos, ruido de fase, sesgo de follaje, exactitud de resolución de 30 m y estimación de pendiente, con las siguientes características:

- ✓ **Los Vacíos de Datos** son áreas en los datos donde aparecieron errores extremados durante el procesamiento o donde no regresó la señal del radar. Tras un análisis preliminar del SRTM para América del Sur, se estima que hay cerca de 500 mosaicos (tiles) con vacío de datos. (Figura 1-8). Para mitigar estos vacíos el proyecto GeoSUR, en cooperación con el grupo de ciencias topográficas del USGS, utilizó el algoritmo de Relleno de Superficie Deltaica (Delta Surface Fill/DSF) de la NGA para rellenar los vacíos con la mejor fuente de relleno disponible para el DEM.
- ✓ Otra propiedad superada por el DEM SRTM es el **Ruido de fase**, causado principalmente por el ruido térmico y de cuantización de los receptores del radar y es en gran parte dependiente de las propiedades de retrodispersión de la superficie (Walker, 2007) [41]. En términos más simples, el ruido de fase es una variación de altura mínima dada de píxel a píxel colindante, y esta variación fue influida por el tipo de superficie de la cual se reflejaba la transmisión del radar. Por ejemplo, un área con cobertura de bosque va a tener menos ruido que las tierras agrícolas por el modo en que la señal del radar rebota en la superficie (Walker, 2007) [41]. Este error ya se había anticipado antes de la misión y se

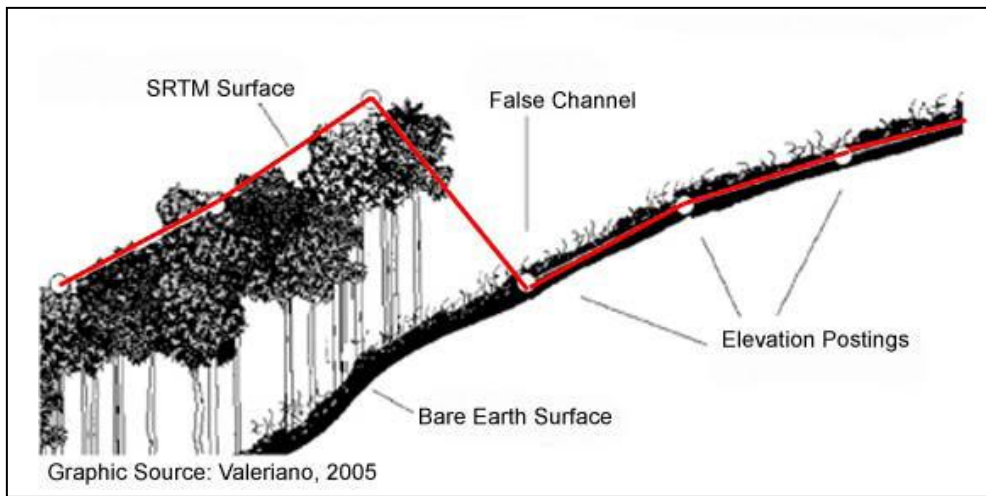
establecieron controles para minimizar el error vertical a 8 metros aproximadamente (Farr, 2007) [6].

Figura 1-8 Extensión de vacíos de los datos SRTM en Suramérica



Fuente: <http://geosur.caf.com/upload/pubs>

- ✓ Una característica altamente discutida del DEM SRTM es el **sesgo del follaje** (o dosel vegetal). Debido a la corta (5,6 cm) longitud de onda de la Banda C, la mayoría de las ondas del radar recibidas sobre áreas densamente vegetadas se reflejan de vuelta en el follaje, bastante por encima de la superficie de la tierra desnuda (Kellndorfer, 2004) [22]. Uno de los motivos por el cual resulta problemático para los hidrólogos es el modelaje de una red de drenaje, por ejemplo, en un área de selva densa donde se esté deforestando. A veces se crean redes de canales falsos por causa de valores de elevación contrastantes entre la selva y las áreas taladas (Figura 1-9) (Valeriano, 2005) [40].

Figura 1-9 Sesgo o follaje y canopic

- ✓ **Slope (Pendiente)** es un producto derivado valioso de cualquier DEM y forma parte de muchos modelos de procesos superficiales terrestres, tales como el modelaje de deslizamientos de tierra. Varios estudios han dejado constancia de que la pendiente se subestima en áreas de topografía pronunciada y sobreestimada en áreas de poco relieve (Guth, 2006 [15]; Jarvis, 2004 [18]; Farr, 2007 [6]). Tanto la subestimación de pendiente en áreas escarpadas como su sobreestimación en áreas más planas es una influencia combinada del algoritmo de error y del error de ruido de fase (Farr, 2007) [6].

1.3 Procesamiento digital en la formación de modelos de superficie y mejoramiento de imágenes provenientes de sensores radar

Existen técnicas y procesamientos digitales utilizados para el mapeo topográfico y generación de Modelos Digitales de Elevaciones -DEM (Massonet & Rabaute, 1993) [27], tales como la Interferometría. Para poder aplicar esta técnica es necesario tener ciertas características y dos imágenes SAR. También para la generación de dichos modelos de superficie se puede realizar por medio de estereoscopia con pares estereoscópicos procedentes de datos radar. En la actualidad se carece de pares de imágenes con características interferométricas que cubran el territorio Colombiano, y de imágenes estereoscópicas apropiadas para realizar dichas técnicas digitales correspondientes al

sector de la zona de interés, ya que hasta el momento solo se cuenta con 3 pares interferométricos de imágenes Alos Palsar del sector de Saldaña, localizado en el departamento de Tolima y los pares estereoscópicos pertenecientes a INGEOMINAS, que cubren la zona de estudio propuesta, no se pudieron utilizar en su totalidad. Sin embargo y dejando hincapié que para la generación de modelos de la superficie del terreno mediante datos de sensores remotos se debe aplicar dichas técnicas, se explica de manera general la técnica interferométrica que forma modelos de superficie a continuación.

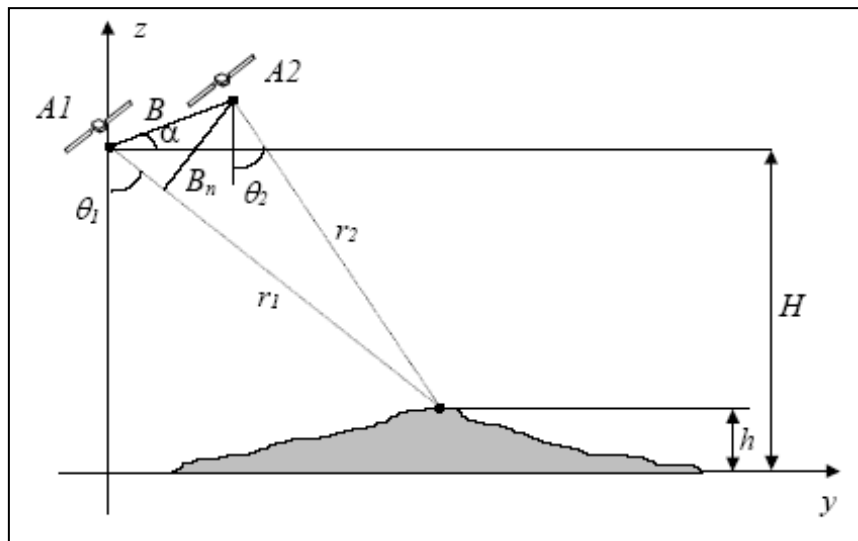
1.3.1 Aplicación de Interferometría

La interferometría SAR es una técnica establecida que está basada en la combinación de dos imágenes SAR de la misma escena adquirida desde puntos de vista ligeramente diferentes. La geometría de un sistema SAR interferométrico opera como se muestra en la Figura 1-10. Dos sistemas SAR recorriendo trayectorias paralelas observan el terreno desde direcciones ligeramente diferentes, de modo que se adquieren dos imágenes SAR desde dos puntos de vista ligeramente diferentes θ_1 y θ_2 . La separación entre las trayectorias se denomina línea de base B. Si ambas imágenes se adquieren en diferentes pasos orbitales (en el caso de SAR orbital) o vuelos (para SAR aerotransportados), el sistema es entonces conocido como interferometría repeat-pass. Sin embargo, si ambas imágenes SAR son adquiridas al mismo tiempo, recibiendo la señal devuelta desde las dos posiciones diferentes de antena durante el mismo vuelo, el sistema es entonces conocido como Interferometría single-pass, esta técnica se realizó para la generación del DEM-SRTM para el territorio Colombiano.

Se debe generar un interferograma, por lo cual se multiplica una imagen por el complejo conjugado de la otra. Así, la fase del interferograma corresponde a la diferencia de fase de ambas imágenes SAR, calculada píxel a píxel. La fase de cada imagen SAR está relacionada con la distancia entre las antenas y la tierra y por lo tanto a la geometría de la escena. La relación geométrica entre la fase interferométrica y la altura de la escena observada hace posible generar un Modelo Digital de Elevación (DEM) de la superficie terrestre iluminada. La calidad del DEM generado depende de la calidad de la fase interferométrica. Para obtener un interferograma libre de ruido, la diferencia de fase entre las dos imágenes SAR debe ser referida únicamente a la topografía de la escena. El

parámetro usado para evaluar la calidad de fase es la denominada coherencia interferométrica (Bamler & Just 1993) [1], que puede ser interpretada como una herramienta útil para medir la semejanza entre las dos.

Figura 1-10 Geometría de un sistema SAR interferométrico



Donde,

A_1 y A_2 sensores radar, captura de imagen 1 e imagen 2

B Línea Base – Separación entre sensores

B_n Línea de Base efectiva

H altura de la plataforma del sensor al elipsoide de referencia

h altitud el punto en observación

r_1 y r_2 distancia sensor-objetivo

θ_1 y θ_2 Ángulos de inclinación

La Interferometría permite medir la altura de cada uno de los puntos de la imagen. Además, mediante la integración de valores de pendientes, la interferometría permite obtener modelos digitales de elevación del terreno. Estos DEM son especialmente adecuados para la evaluación precisa de la topografía en las zonas con relieve moderado y pueden, por tanto, complementar perfectamente las técnicas de estereoscopia óptica.

1.3.2 Mejoramiento de una imagen radar

Algunas de las características de procesamiento digital aplicado a las imágenes radar para crear una imagen radiométricamente calibrada y eliminar sus distorsiones geométricas son:

■ Supresión de Ruido –Speckle

El ruido o speckle en una imagen radar es provocado por el tratamiento coherente de las señales de retrodispersión. Varios métodos diferentes se utilizan para eliminar el ruido speckle, en base a diferentes modelos matemáticos del fenómeno (Kanevsky, M. 2008) [20]. Uno de los métodos, por ejemplo, realiza transformaciones múltiples, con la media del promedio de comparaciones incoherentes. Un segundo método implica el uso de filtros adaptivos y no adaptivos en el procesamiento de la primera señal (en filtros adaptativos sus ponderaciones se realizan a través del nivel digital de la imagen, y cuando se visualiza la imagen de forma uniforme no se aplican estos coeficientes ni los filtros). Tal filtración elimina también la información de imagen real, en particular la información de alta frecuencia. El mejor filtro es el que preserva los bordes y detalles en las áreas de alta textura (como los bosques, zonas urbanas y rasgos geológicos). El filtrado no adaptivo es más sencillo de implementar, y requiere menos potencia de cálculo. (Franceschetti & Lanari, 1999) [7]. El ruido en la imagen también puede representar alguna información útil, especialmente cuando está vinculada al ruido láser y al fenómeno de speckle dinámico, donde los cambios del patrón de moteado, con el tiempo, puede ser una medida de la actividad de la superficie (Zamperoni, 1995) [43]. Hay dos formas de filtrado no adaptivo para esta clase de ruido: una basada en la media y otro en la mediana (en una zona rectangular de píxeles de la imagen). Este último es el que mejor preservar los bordes. Hay muchas formas de filtrado adaptativo, incluyendo el filtro de Lee, Frost, y el refinado de gamma (RGMAP). Todos ellos se basan en tres premisas fundamentales (Mather & Tso, 2009) [26]. en sus modelos matemáticos:

- El speckle es un ruido multiplicativo, es decir, está en proporción directa al nivel de grises locales en cualquier área.
- La señal y el ruido son estadísticamente independientes entre sí.
- La media muestral y la varianza de un solo píxel son iguales a la media y la varianza de la zona que se centra en cada píxel.

El ruido speckle aparece en imágenes con iluminación coherente, como las de scanner ultrasónico, sonar y radar de apertura sintética (SAR). Este ruido se desvía del modelo clásico, en el que se supone debe tener un componente Gaussiano, independiente de la señal y adicionado al verdadero valor. En imágenes de radar el speckle, es multiplicativo

y no Gaussiano (en los formatos de intensidad y amplitud), y dificulta la interpretación de las imágenes porque el “efecto de sal y pimienta” o moteado corrompe la información real de la superficie del terreno (Bustos O.H. et al, 2002) [2]. El primer y segundo orden estadístico de las propiedades de disminución del “efecto de sal y pimienta” o moteado son bien descritos por Goodman 1975 [11] y Funk et al. 1986a. [8]. El efecto de moteado es caracterizado por una distribución exponencial negativa en un singlelook de intensidad de la imagen SAR, y una distribución de Rayleigh se aplica en la amplitud de la imagen. La función de densidad de probabilidad de la intensidad sigue una distribución Gamma en las imágenes multi-look (Ulaby et al 1986b) [39]. Actualmente son incorporados modelos para evitar efectos de ruido con las técnicas de filtrado, y el modelo más eficaz asumido en el modelo multiplicativo ha sido el descrito por Durand et al (1987) [4].

■ Corrección radiométrica de las imágenes radar

La corrección radiométrica calibra la imagen de radar, sobre la base de información del terreno (según modelos digitales de elevación) y la geometría de adquisición de información. Los productos resultantes son el coeficiente de retrodispersión radar Sigma-cero (σ_0) y el correspondiente ángulo de incidencia. La corrección radiométrica del terreno se basa en una imagen de radar existente ortorectificada y/o geocodificada, se utiliza por lo general el DEM-SRTM. La imagen de entrada deben transformarse para el radar de brillo en Beta-cero (β_0), ya sea en unidades de decibeles o lineal. La imagen Beta-cero se produce con la conversión de unidades a decibeles y las imágenes sin geocodificar.

La calibración de una imagen SAR es el proceso de convertir una imagen de amplitud lineal en una imagen de poder calibrar radiométricamente logarítmica. La imagen de la entrada es en unidades de números digitales (DN), mientras que la imagen de salida es en unidades de sigma (σ_0), que es la relación (en dB) de la potencia. Las imágenes del SAR son monocromáticas y la intensidad luminosa relativa de un pixel se relaciona directamente a la reflexividad del radar del objetivo de terreno que representa. El alcance de los valores radiométricos está entre los dos extremos: completamente oscuro y completamente brillante. El Anexo B ilustra como la tecnología del radar puede afectar los valores digitales usados para representar dos áreas muy similares. Por lo tanto, si un objeto refleja mucho de su energía de radar incidente de regreso al sensor, este tendrá

un valor digital relativamente alto y se representará como un píxel blanco. Si un objeto no refleja mucha energía de regreso al sensor, éste lograra un valor digital bajo y se representara como un píxel negro.

■ Corrección geométrica y/o geocodificación de las imágenes radar

La corrección de la geometría del terreno elimina algunas distorsiones utilizando la información de los valores de altura de un modelo de elevación digital (DEM). En este proceso, el DEM se asigna a la geometría de la imagen SAR y su rango de inclinación. Este proceso es el refinamiento de la geolocalización de las imágenes SAR (Anexo F), haciendo coincidir la imagen de SAR real con una imagen de SAR simuladas derivadas del DEM. Luego las imágenes de RadarSat-1 se convirtieron según la geometría de alcance sobre el terreno del DEM de 30 m de resolución para esta zona.

Una serie de algoritmos se han desarrollado para procesar eficazmente los datos SAR de su señal primaria. El algoritmo de procesamiento de SAR más común es el rango de Doppler, que con precisión y eficacia da cabida a parámetros diferentes, tales como centroide Doppler, la tasa de acimut modulación de frecuencia y el rango de la migración de los píxeles. El algoritmo de gama Doppler logra una mejor calidad de imagen sustituyendo el interpolador para el rango de celdas de la migración de corrección con una operación de escala en intervalo de tiempo, es decir en dominio de la frecuencia del azimut.

■ Sinergia de imágenes

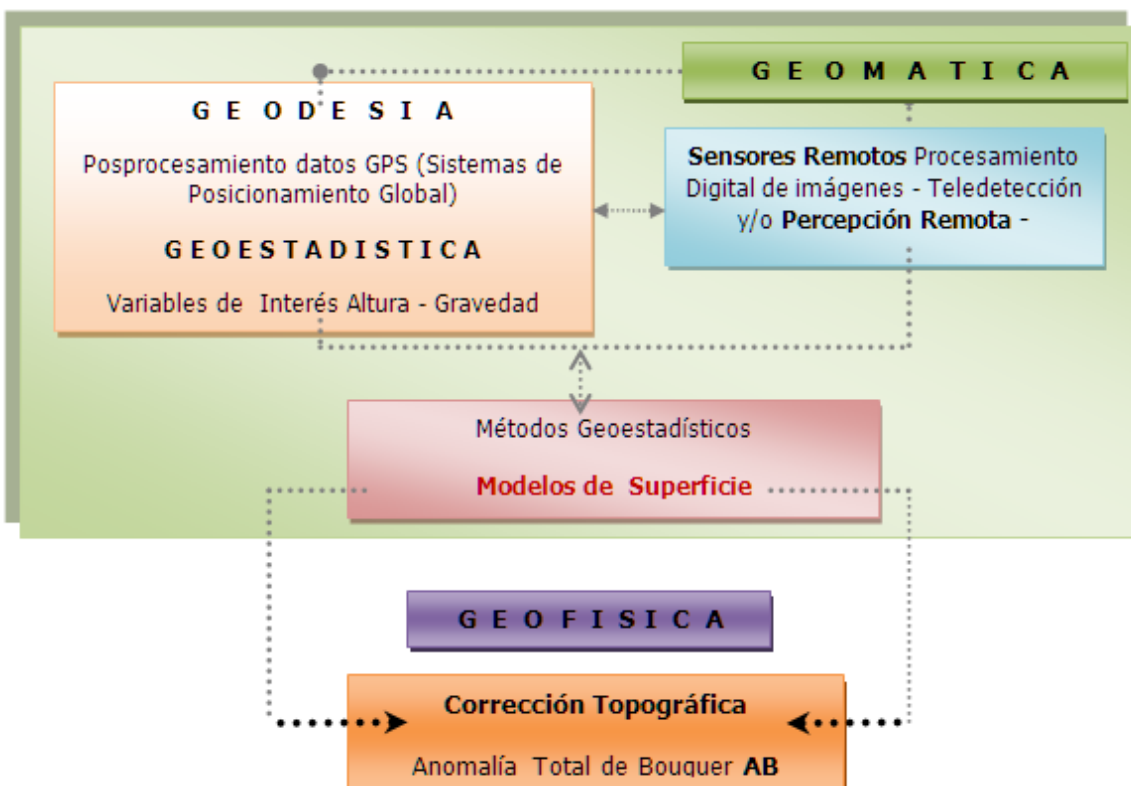
Las imágenes ópticas y de radar caracterizan propiedades de la escena en diferentes regiones del espectro electromagnético. En la región óptica, la respuesta de la escena es básicamente debida a la reflectividad del terreno. En la región de radar la respuesta es más compleja dependiendo de factores físicos y geométricos del terreno. Las propiedades de ambas regiones son complementarias y conjuntamente proporcionan información valiosa para evaluar el comportamiento de la escena (Lira, J. 2009) [25]. La combinación de imágenes radar y ópticas presenta dos posibilidades:

- La formación de compuestos falso color con el objeto de realzar visualmente los rasgos del terreno presentes en las imágenes
- La inclusión de ambas imágenes en procesos de análisis digital.

2. Metodología

Se sintetiza a continuación las diferentes ciencias (con sus herramientas y procesos Figura 2-1) que contribuyen a generar el formato de imagen, necesario para optimizar la corrección por efectos del terreno en el cálculo de las anomalías gravimétricas de interés, que fue aplicada en la zona geográficamente definida y localizada en la parte central del departamento de Santander – Colombia (Figura 2-2).

Figura 2-1 Ciencias y procesos involucrados en la corrección topográfica en estudios gravimétricos



2.1 Descripción de la metodología

En la creación de un formato de imagen para la corrección de terreno, utilizado en los estudios gravimétricos y en la interpretación de anomalías gravimétricas, se debe tener en cuenta los siguientes procesos:

2.1.1 Adquisición de datos altimétricos y de gravedad de buena exactitud y precisión

La adquisición de los datos de lecturas de deriva gravitacional mediante el levantamiento de estaciones terrestres, se debe hacer en lo posible de alta precisión, y con un posprocesamiento tanto geodésico (D-GPS) como gravimétrico; las estaciones deben ser localizadas dentro y fuera de la zona de interés; este procedimiento se debe realizar para obtener buenos resultados y tolerancias de localización y principalmente para garantizar un buen resultado en la componente vertical (variable altimétrica) indispensable en la generación de modelos de superficie, esto con el fin de realizar comparaciones de los datos adquiridos en campo con los datos ofrecidos por las imágenes y poder utilizar un formato imagen de una manera adecuada para la generación del cálculo de las anomalías gravimétricas.

En forma general el procesamiento de los datos geodésicos y geofísicos se explican de acuerdo al interés de los temas relacionados con la investigación en Geomática, por lo cual no se especifican cálculos ni procesos, ni se hace hincapié en el posprocesamiento de los datos de coordenadas ni datos de gravedad. Para la adquisición de datos geodésicos se utiliza receptores GPS's con características especiales en cuanto a precisiones de las coordenadas a obtener, en especial la componente vertical para su conexión a puntos de nivelación de precisión. Se debe considerar un modelo geoidal para confirmar valores de campo, y su aplicación en la determinación de parámetros, ya que desde una perspectiva geodésica, son el punto de partida para detectar valores de variaciones de gravedad significativas. De esta manera, el adecuado posicionamiento de puntos y de lecturas gravimétricas junto con el conocimiento geológico en superficie de la zona de interés, garantizara la calidad del levantamiento gravimétrico como tal.

Para los datos de gravedad se deberá utilizar un gravímetro, y las correcciones de los datos de las lecturas obtenidas en campo se procesan mediante la utilización del software especializado *Geosoft Oasis Montaj 6.2*, siempre y cuando se haga su debida verificación. Para llegar al cálculo de anomalías y generación de mapas de Bouguer se deben realizar correcciones por: Aire libre (C_{AL}), de Bouguer (C_B) y Topográfica (C_T); esta ultima corrección es la que necesita una imagen con información de coordenadas X, Y y Z como apoyo a la generación del cálculo y de la anomalía de Bouguer Total, tal como se observa en el diagrama de flujo de la Tabla 1-1.

2.1.2 Análisis estadísticos de los datos primarios (altura y gravedad) para la generación de anomalías gravimétricas

Se debe realizar el análisis geoestadístico a los datos de las variables altura y gravedad obteniendo coeficientes de correlación, para conocer su comportamiento y realizar su validación con los datos de mapas de superficie, con el propósito de obtener una visión en imágenes de anomalías geofísicas gravimétricas y para la creación de modelos geológicos de subsuperficie explicativos. Se debe garantizar el mejor modelo de aplicación de la variable de elevación y su representación como superficie terrestre, con el fin de validar los datos de la variable de elevación (alturas en metros sobre el nivel del mar) a los datos de las imágenes mediante el procesamiento digital de las mismas y utilizando los algoritmos de modelamiento de la superficie con los distintos programas especializados que realizan este proceso y actualmente ofrecen buenas alternativas.

Se deben realizar los siguientes análisis a las variables de altura y gravedad (para establecer su comportamiento y determinar el mapa de superficie y las anomalías gravimétricas correspondientes):

- ✓ Análisis descriptivo de las dos variables primarias
- ✓ Análisis de estacionariedad y normalidad de las variables
- ✓ Aplicación de pruebas de normalidad
- ✓ Aplicación de métodos de regresiones
- ✓ Modelamiento de los datos altimétricos según métodos de Kriging y determinístico

2.1.3 Análisis de los datos de altura del DEM -SRTM- de la zona de estudio y de los procesos con datos de imágenes radar

Se debe realizar el análisis de la calidad de los datos altimétricos ofrecidos por el Modelo de Elevación Digital DEM-SRTM para el sector de la zona de interés y extraer los datos de las imágenes de radar disponibles.

Los siguientes análisis son los que se deben aplicar a los datos altimétricos proporcionados por el DEM:

- ✓ Generación del óptimo mapa de superficie para establecer zonas deficientes de datos topográficos.

Por lo general se realiza este tipo de análisis con procesos digitales, debido a las características de los datos que proporcionan cada producto, mediante el cálculo geoestadístico, por medio de programas especializados que puedan extraer la información. Las pruebas con la imagen del DEM consisten en variar el ángulo de incidencia (I), el ángulo de declinación (D), la escala vertical (V) y aplicar histogramas ecualizados (HE) para determinar la mejor posición y relación que tiene la toma de datos con respecto a la información de superficie suministrada y determinar el aspecto de los objetos de la imagen. El ángulo de incidencia (I) describe la relación entre la iluminación de la imagen de origen radar y la superficie de la tierra. Específicamente, es el ángulo entre el rayo del sensor de radar y un objeto en la superficie, este ayuda a determinar el aspecto de un objeto en la imagen. El ángulo de declinación (D) es la variación de fuente de luz, determinados debido a la dirección del pase orbital y el reflejo de luz "natural". El histograma ecualizado (HE) en una imagen representa la ampliación del rango de variación de píxeles para cada nivel de colores mediante la transformada del histograma de la imagen con una distribución uniforme y normal, este resultado de la ecualización maximiza el contraste de una imagen sin perder información de tipo estructural, conservando su entropía.

- ✓ Procesos de análisis topográficos mediante la realización de mapas de sombras, de contornos, realces de unidades con fusiones de imágenes ópticas y radar (DEM-SRTM), para la detección de franjas y zonas deficientes de los datos del DEM-SRTM.

Para los datos radar los procesos que se deben llevar a cabo son mediante la aplicación de técnicas interferométricas (Anexo G) y/o estereoscópicas en la adquisición de datos de altura; y, revisar los archivos CEOS de datos de alturas elipsoidales si es el caso y se proporciona esta información.

También se debe explorar los archivos originales de los datos radar para la creación de las imágenes, y establecer el procesamiento digital básico y aplicación de filtros para el mejoramiento de cada una de las imágenes-radar resultado, mediante el análisis de textura y demás componentes que ayuden a disminuir las distorsiones y realizar las correcciones geométricas y radiométricas de cada imagen.

2.1.4 Validación de datos de altura con imágenes procesadas y creación de mapas de superficie

Para la validación y generación de un mapa de alturas corregido, representando la forma del terreno de la zona de interés, y poder realizar la corrección topográfica en un estudio gravimétrico, se debe analizar y determinar:

- ✓ El conjunto de datos que pueden conformar el modelo para la generación del mapa de superficie. Durante este proceso y análisis es importante detectar las estaciones tomadas directamente en terreno con las franjas deficientes de los datos proporcionados por los datos DEM, mediante la localización de las estaciones sobre el óptimo mapa generado del DEM-SRTM.
- ✓ El estado de los mejores puntos de control por medio de las diferencias de alturas entre las estaciones de los datos directos, tomados con GPS y los datos extraídos o proporcionados del DEM-SRTM de la región o zona de interés.
- ✓ Los procesos de modelamiento de superficie mediante los métodos de interpolación para los nuevos datos establecidos de la variable altimétrica.

Para validar las imágenes resultado de datos radar y poder utilizarla en la corrección topográfica, se debe realizar el procesamiento digital para extracción de los datos y mejoramiento de las imágenes radar, de acuerdo a las correcciones geométricas respectivas realizadas para cada imagen, geocodificándolas de acuerdo a las coordenadas y con el valor de altura corregida de las imágenes DEM-SRTM.

2.1.5 Corrección de terreno y Anomalías de Bouguer Total

El proceso de corrección del terreno actualmente se desarrolla bajo el módulo especializado del programa *geosoft*, que está diseñado según el algoritmo de Nagy, utilizando un DTM –Modelo Digital del Terreno- para el cálculo de esta corrección por cada localización y estación referencia debido a los gradientes gravitacionales de sus zonas, como son: la de triángulo, prisma y anillo seccional, tal como se explico en el capítulo de marco teórico. Por lo que esta corrección por terreno se debe realizar con la imagen corregida, obteniendo valores corregidos por terreno o topográficos y utilizándolos en la generación de los cálculos de anomalías gravimétricas. Luego se realiza el mapa de Anomalías de Bouguer Total (B_T), mediante el método óptimo de interpolación para los valores de esta Anomalía.

Establecido el nuevo mapa de Anomalías de Bouguer (B_T), se procede a compararlo con el mapa anteriormente generado con los datos del DEM-SRTM original y sin ninguna corrección y con todos los datos de las variables primarias (que no han tenido procesos geoestadísticos), con el fin de establecer las zonas subestimadas o sobreestimadas en el estudio gravimétrico de la zona de interés.

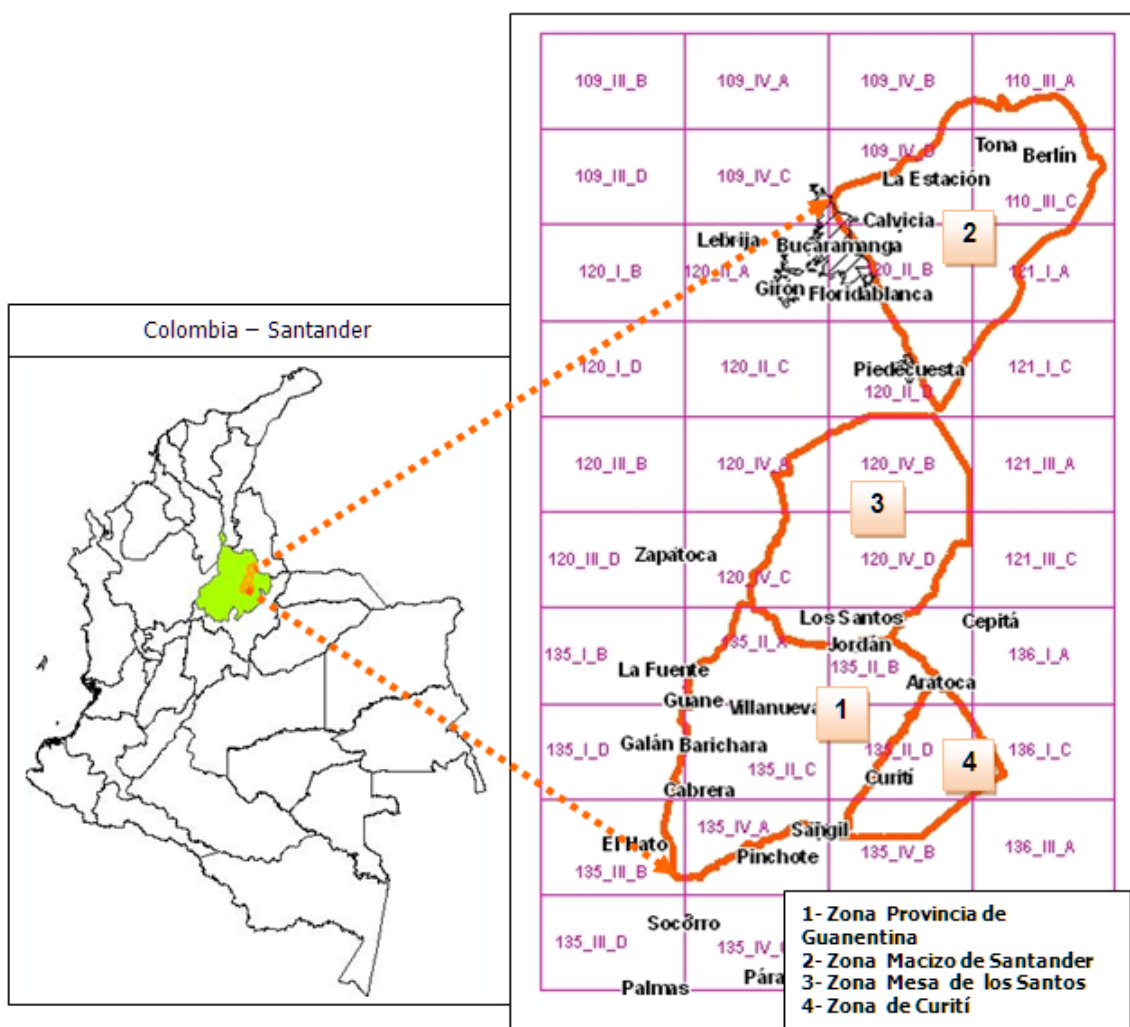
2.2 Localización de la zona de estudio

Es importante establecer la zona de estudio de acuerdo a los datos primarios recolectados en terreno como son datos de las variables de altura y de gravedad con la información de las imágenes que proporcionen datos altimétricos o pares de imágenes que se les pueda realizar procesos de extracción de altura y elaborar modelos digitales del terreno-DTM-de la misma zona para la determinación de anomalías gravimétricas.

Para el desarrollo del presente proyecto se determinó la zona de estudio la parte central del departamento de Santander, debido a la existencia de datos altimétricos y de

gravedad; y, al cubrimiento del DEM-SRTM sobre el área de (4) cuatro subzonas hidrogeológicas, como se observa en la Figura 2-2, que con el propósito de conocer la potencialidad de agua subterránea, en 1600 km² localizados en esta zona, se ejecutó un trabajo de investigación geológica y geofísica desarrollando una visión en imágenes de anomalías gravimétricas y la creación de los modelos geológicos de subsuperficie explicativos, ejecutado por el grupo de hidrogeología de la subdirección de Recursos de Subsuelo, del Instituto Colombiano de Geología y Minera –INGEOMINAS, dentro del Proyecto “PEXAS -Proyecto de Exploración de Agua Subterránea para el territorio Colombiano-”, entre los años de 2006 a 2008 [31].

Figura 2-2 Localización del área referencia para la aplicación de la Metodología de la corrección de terreno o topográfica y la determinación de anomalías gravimétricas



3.Resultados y discusiones

El desarrollo de este capítulo tiene como fin dar a conocer los resultados y discusiones según los insumos y los datos tanto primarios como datos de imágenes de radar, para la realización de la corrección de terreno en la zona central del departamento de Santander.

3.1 Resultados

A continuación se dan a conocer los procedimientos y resultados según la descripción de los pasos a seguir mencionados en la metodología propuesta.

3.1.1 Procedimiento en la adquisición y procesamiento de los datos geodésicos y gravimétricos

Para el estudio gravimétrico terrestre en la zona de interés fue necesario realizar la captura de los datos geodésicos y de gravedad para el cálculo y análisis de las anomalías de Bouguer completa (B_T), además los datos de altura sirvieron como punto de comparación con los datos del DEM-SRTM y fueron las estaciones georeferencia de las imágenes de radar.

Las lecturas de coordenadas geodésicas (latitud ϕ , longitud λ y altura elipsoidal) y de gravedad corresponden a 467 estaciones gravimétricas (Figura 3-1) localizadas en las cuatro subzonas de interés, incorporándose bases de control geodésico (Figura 3-2) y bases gravimétricas (Figura 3-3) de amarre. Los equipos GPS's empleados fueron de marca *trimble* y *topcon* (L1/L2). Las bases se establecieron con equipos GPS de doble frecuencia (L2). La determinación de las coordenadas de estos puntos fue realizada mediante el uso del software de procesamiento *gipsy-oasis-II*. Estas bases fueron a su

Figura 3-1 Localización geográfica de las estaciones gravimétricas de la zona de estudio

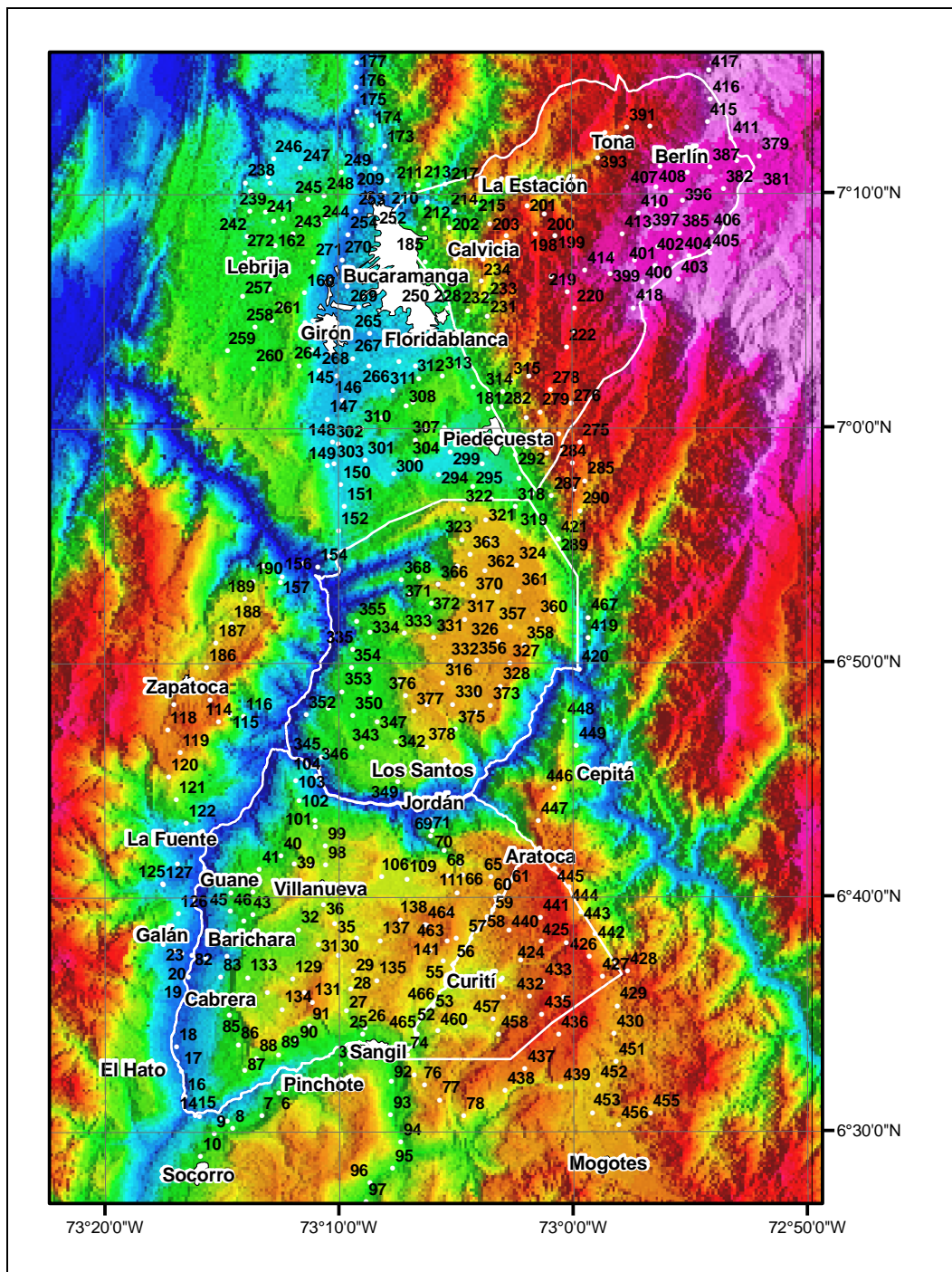


Figura 3-2 Localización de bases geodésicas en la zona de Guanentina

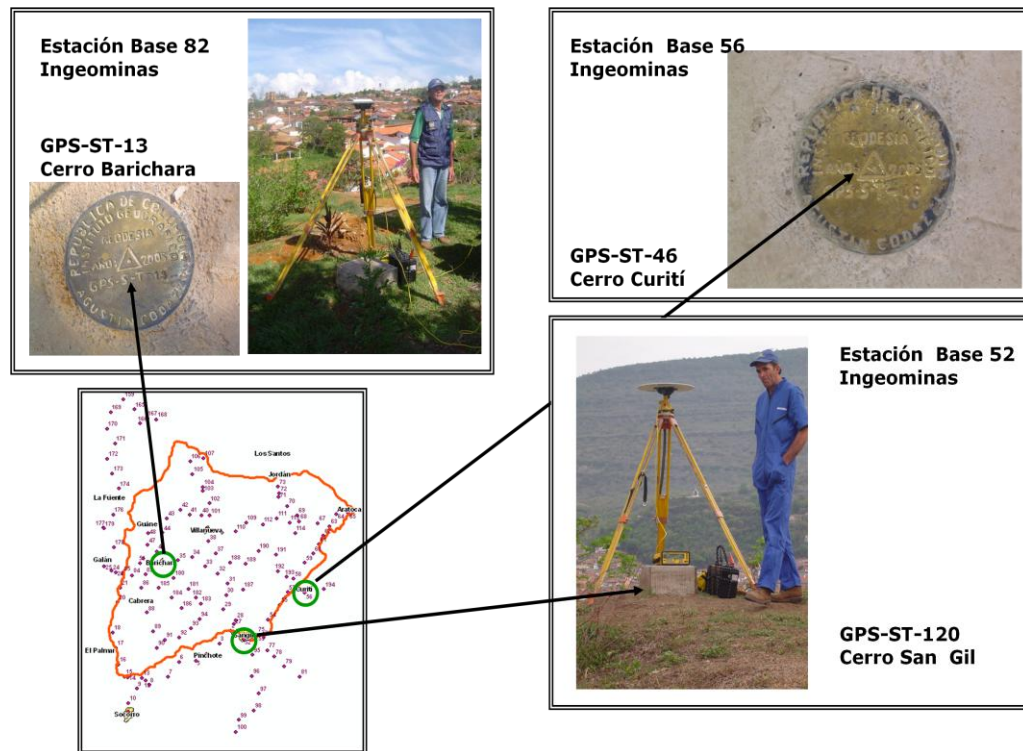
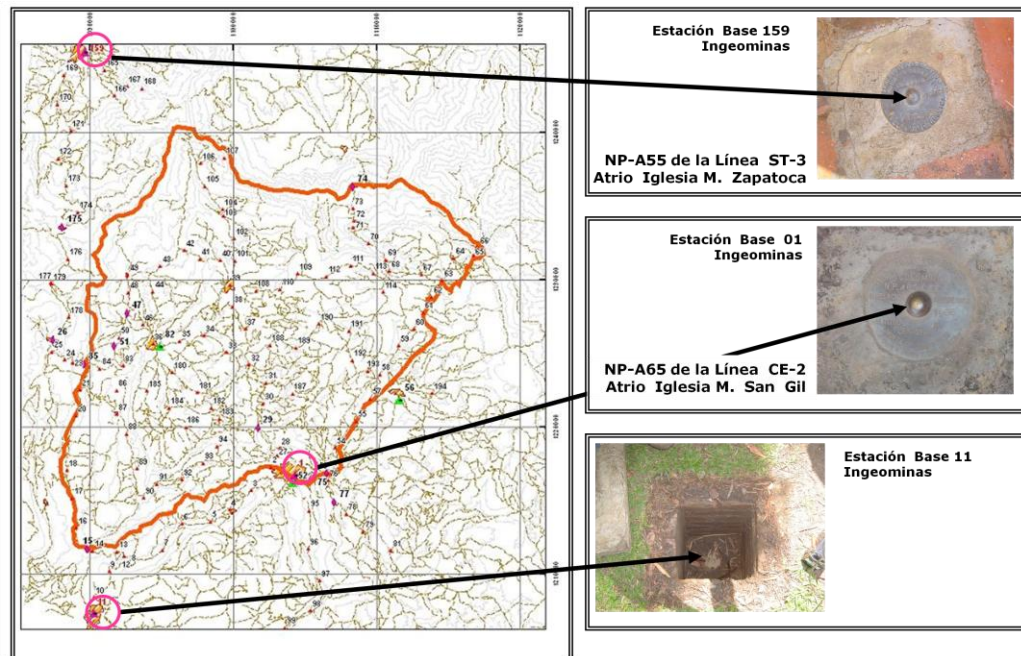
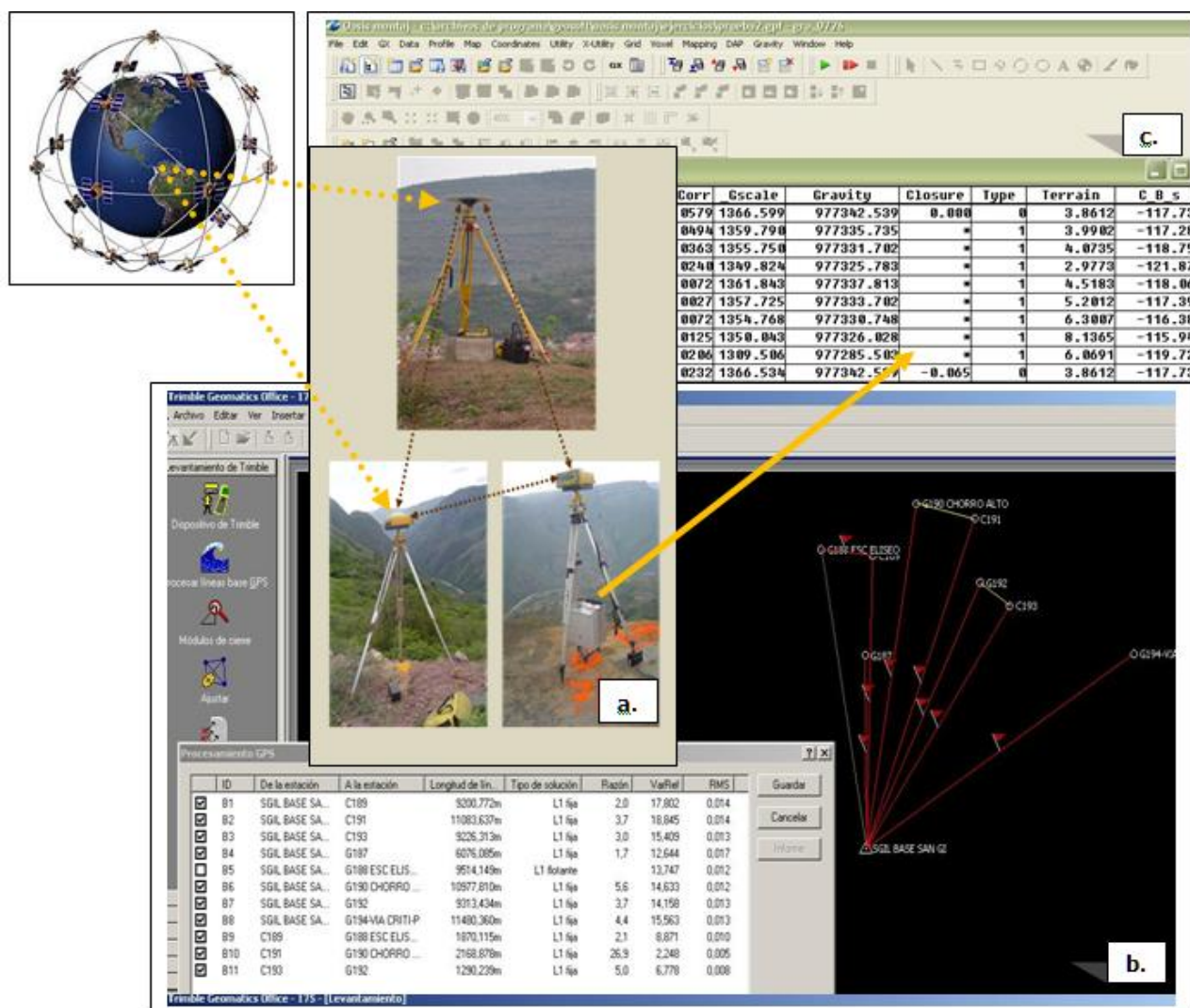


Figura 3-3 Localización de bases gravimétricas



Cada sitio fue ocupado durante 20 minutos, teniendo en todos los casos, redundancia en la información de manera simultánea, rastreando con varios equipos GPS, uno de doble frecuencia (estación base) y dos de frecuencia sencilla (Figura 3-4-a). El procesamiento de estas líneas base fue realizado con el software *gpsurvey* de la casa *trimble* y *topcon tolos*. Para la adquisición de datos de coordenadas y altura se siguió con la metodología llevada a cabo mediante el Sistema de Posicionamiento por satélite (GPS), garantizando medidas de altura con un rango de tolerancia de 0.04 m (Figura 3-4-b).

Figura 3-4 Adquisición y procesamiento de datos altimétricos y de gravedad en la zona de estudio

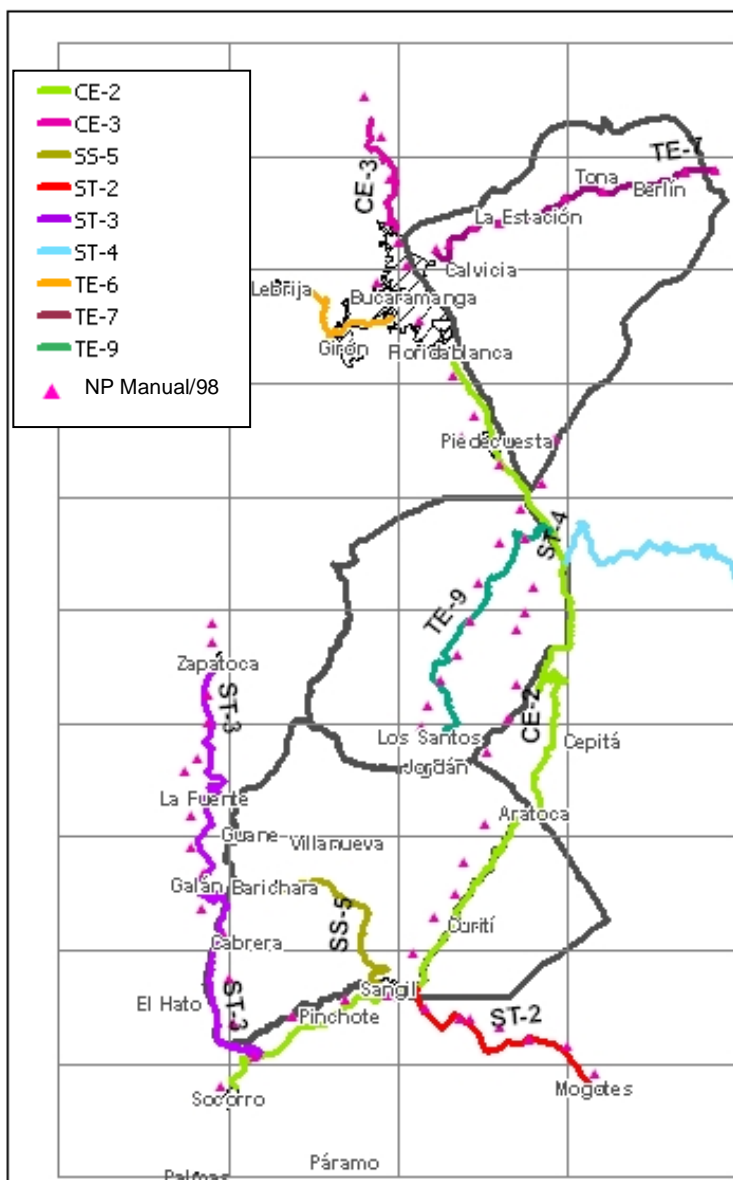


- Procedimiento de adquisición de los datos
- Procesamiento de los datos geodésicos
- Procesamiento de los datos gravimétricos

El procesamiento de las estaciones gravimétricas fue realizado con el software *Geosoft Oasis Montaj*, corroborando los diferentes cálculos de derivas, garantizando medidas de cierre con un rango de tolerancia de 0.09 en zonas planas y 0.2 en zonas montañosas (Figura 3-4-d).

Para el estudio gravimétrico de las zonas de interés se tuvieron en cuenta puntos de nivelación (NP) de líneas de la red nacional de nivelación geodésica del Instituto Colombiano Geográfico Agustín Codazzi [5] (Figura 3-5), a fin de poder hacer la conexión entre la información que proporciona el sistema GPS (altura elipsoidal WGS84) y la información ortométrica correspondiente a cada uno de dichos puntos.

Figura 3-5 Localización de líneas y estaciones de nivelación de la Red Geodésica y Gravimétrica Nacional –Año 1998–



Zona 1. Guanentina:

- ✓ **Línea CE-2** (Barbosa-Bucaramanga) Se recopilaron los datos de las estaciones encontradas correspondientes al tramo Socorro–Aratoca.
- ✓ **Línea SS-5** (San Gil-Barichara). Línea de nivelación sin datos de gravedad.
- ✓ **Línea ST-3** (Socorro-San Vicente) Se recopilaron los datos de las estaciones encontradas correspondientes al tramo Socorro-Zapatoca.

Zona 2. Macizo de Santander:

- ✓ **Línea CE-2** (Barbosa-Bucaramanga) Se recopilaron los datos de las estaciones encontradas correspondientes al tramo Los Curos–Bucaramanga.
- ✓ **TE-7** (Bucaramanga-Pamplona). Se recopilaron los datos de las estaciones encontradas correspondientes al tramo Bucaramanga-Berlín.
- ✓ **Línea TE-6** (Bucaramanga-San Vicente) Se recopilaron los datos de las estaciones encontradas correspondientes al tramo Bucaramanga-Lebrija
- ✓ **Línea CE-3** (Bucaramanga-La Mata) Se recopilaron los datos de las estaciones encontradas correspondientes al tramo Bucaramanga-Río Negro

Zona 3. Mesa de los Santos:

- ✓ **Línea CE-2** (Barbosa-Bucaramanga) Se recopilaron los datos de las estaciones encontradas correspondientes al tramo Aratoca-Los Curos.
- ✓ **TE-9** (Los Curos-Mesa de los Santos). Se recopilaron los datos de las estaciones encontradas correspondientes al tramo Los Curos-Mesa de los Santos.
- ✓ **Línea ST-4** (Málaga-Los Curos) Se recopilaron los datos de las estaciones cerca de los Curos.

Zona 4. Curiti:

- ✓ **Línea ST-2** (San Gil-Santa Rosita) Se recopilaron los datos de las estaciones encontradas correspondientes al tramo San Gil-Mogotes.

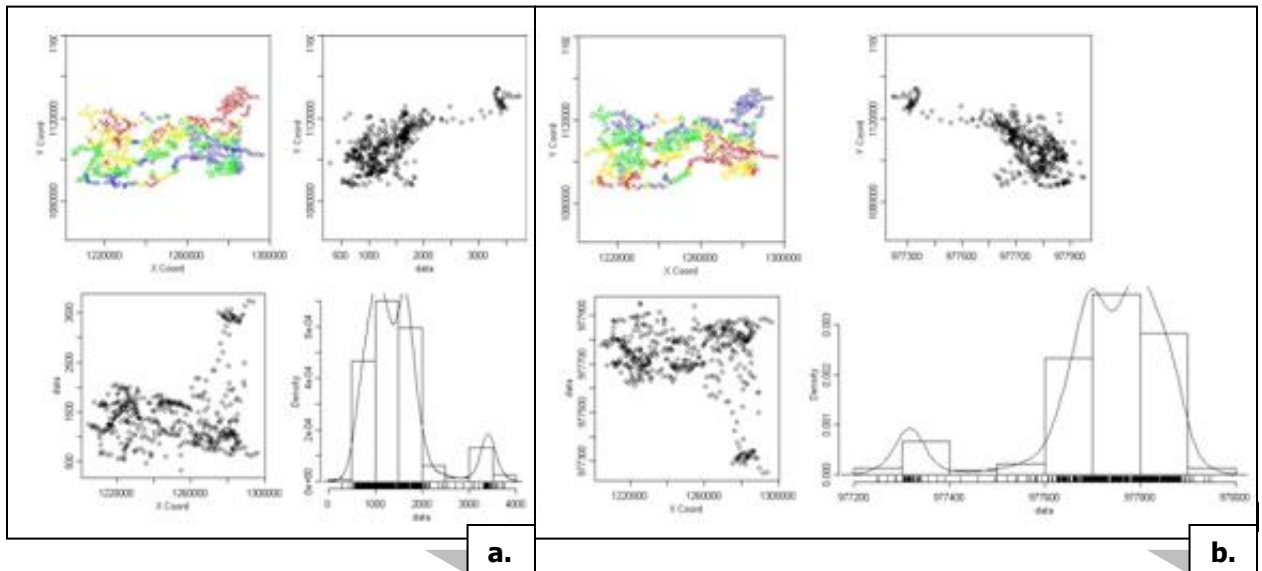
Adicionalmente, para la conexión y ajuste del valor de la gravedad se utilizaron las estaciones pertenecientes a líneas de la red gravimétrica nacional de tercer orden, encontradas en campo y las estaciones gravimétricas registradas del manual de gravimetría de 1998 [5]. Los resultados de la red geodésica nacional vertical están expresados en función del datum Buenaventura, correspondiente al nivel medio del mar. La cartografía colombiana está expresada en términos de elevaciones con respecto a este nivel de referencia. Por tanto, ocupar NP's permite conectar la información tomada con receptores GPS y establecer modelos de ondulación geoidal para zonas de estudio determinadas. El procesamiento se estableció de tal manera que se obtuvieron resultados en los dos sistemas: el correspondiente al sistema GPS, WGS84, obteniéndose los valores de longitud, así como de altura elipsoidal; se estimó además el valor de la ondulación geoidal empleando el modelo geoidal EGM96. Igualmente se hizo la transformación de coordenadas de tal manera que se obtuvieron los valores de latitud y longitud en virtud del elipsoide WGS-84, y coordenadas planas en función del sistema local, en este caso, origen Bogotá.

3.1.2 Análisis geoestadístico de los datos de altura y gravedad de la zona de muestreo

Terminado el levantamiento con GPS y posprocesamiento geodésico de las estaciones gravimétricas para las zonas de la parte central del departamento de Santander, se realizó el debido análisis geoestadístico, que a continuación se presenta, para establecer el mejor modelo de aplicación de la variable de elevación y su representación como superficie terrestre, esto con el fin de validar los datos de la variable de elevación (alturas en metros sobre el nivel del mar) a los datos de las imágenes mediante el procesamiento digital de las mismas y utilizando los algoritmos de modelamiento de la superficie con los distintos programas y software que realizan este proceso y actualmente ofrecen buenas alternativas.

■ Análisis descriptivo de los datos

Con el programa estadístico **R** se generaron los análisis descriptivos de los datos y gráficos de tendencia e histogramas de cada variable (Figura 3-6) proporcionados para el análisis de los datos de Altura y Gravedad, con sus resultados tal como se pueden observar en las Tablas 3-1 y 3-2.

Figura 3-6 Gráficos de tendencia e histogramas de las variables altura (a) y gravedad (b)**Tabla 3-1** Resumen de Análisis estadísticos de las variables de altura y gravedad

Variable	Media	Desv.Estándar	Qinf = 0%	Q1 = 25%	μ =50%	Q3 =75%	Qsup =100%	No.Datos
Altura	1469.604	698.4288	298.889	1009.432	1324.458	1683.571	3744.001	467
Grav	977.719924	143.5941	977.247172	977.683826	977.750017	977.810383	977.949787	467

summary(Datos) En R

Altura	Grav
Min. 298.9	Min. 977247
1st Qu. 1009.4	1st Qu. 977684
Median 1324.5	Median 977750
Mean 1469.6	Mean 977720
3rd Qu. 1683.6	3rd Qu. 977810
Max. 3744.0	Max. 977950

El análisis de estadística descriptiva, se llevó a cabo mediante la aplicación en Excel de XL-STAT con estadísticos de posición, dispersión y asimetría, descritos en la Tabla 3-2.

El rango de la variable altura (diferencia entre el dato mínimo y máximo) es de 3445 m., por lo tanto la media y la mediana varían en 145 m.; y, el rango de la variable gravedad es de 703 mGals, lo cual la media y la mediana varían en 30 mGals, lo que hasta el momento no hay normalidad de los datos. Sin embargo se observa que el coeficiente de variación (el cual indica una relación entre la desviación estándar y la varianza) es de 47% para la variable Altura y que para los datos de gravedad no hay tendencia.

Tabla 3-2 Estadísticos de las variables altura y gravedad

Estadística	Altura	Gravedad
No. de observaciones	467	467
No. de valores perdidos	0	0
Media	1469.591	977719.924
Mediana	1324.514	977750.017
Desviación típica (n-1)	698.429	143.594
Varianza (n-1)	487803.325	20619.256
Mínimo	298.889	977247.172
Máximo	3744.001	977949.787
Coefficiente de variación	0.475	0.000
Asimetría (Pearson)	1.545	-1.640
Curtosis (Pearson)	2.270	2.521
Suma	686298.993	456595204.363

El valor del coeficiente de curtosis se aproxima a 3, indicando que el conjunto de datos para las dos variables, presentan una curva leptocúrtica presentando una distribución más apuntada, con elevación superior a la curva normal. La asimetría de Pearson en la variable de altura está indicando que tiene un sesgo muy significativo (de 1.450) a la derecha, y que para la variable de gravedad tiene un sesgo a la izquierda, casi con la misma magnitud que el de altura, esto debido a la relación inversamente proporcional que tienen estas dos variables.

■ Análisis de estacionariedad de los datos

El análisis de estacionariedad se realizó a partir de las matrices de: correlación espacial, que en el programa R concuerdan con la prueba de Pearson a un nivel de confianza de 0.95 realizado por el programa estadístico XL-STAT (Tabla 3-3).

Tabla 3-3 Resumen matriz de correlación y pruebas de Pearson

	Altura	Este	Gravedad	Norte
Altura	1.0000000	0.7321752	-0.9864396	0.2095865
Este	0.7321752	1.0000000	-0.7235308	0.2981374
Gravedad	-0.9864396	-0.7235308	1.0000000	-0.2483146
Norte	0.2095865	0.2981374	-0.2483146	1.0000000

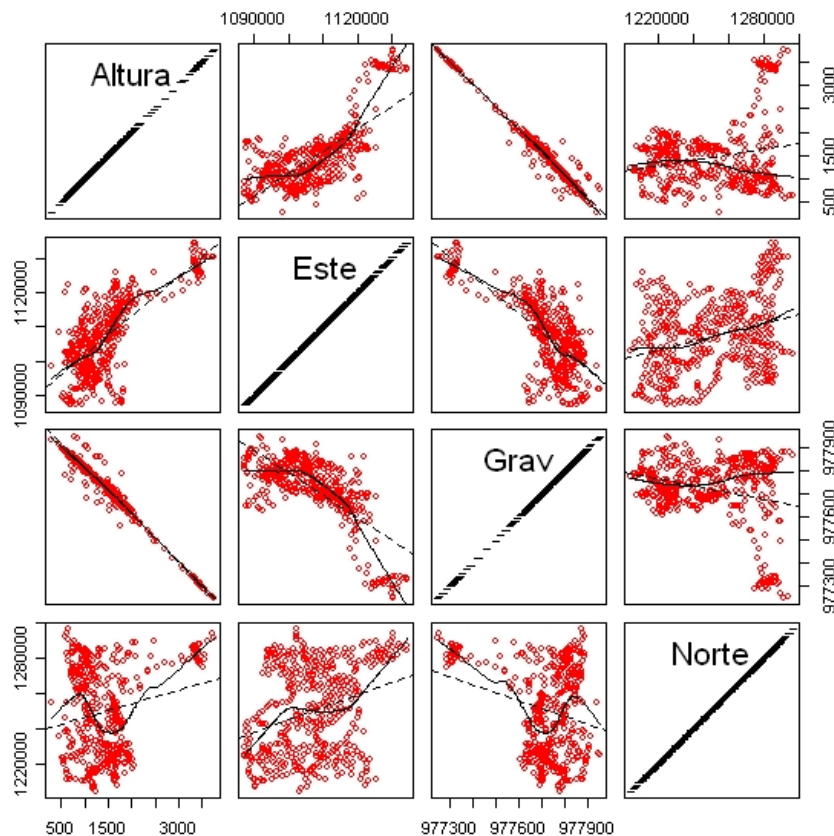
Continuación... Resumen pruebas de Pearson

data: Datos\$Este and Datos\$Altura t = 23.2302, df = 467, p-value < 2.2e-16 alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0 95 percent confidence interval: 0.6871872 0.7715691 sample estimates: cor 0.7321752	data: Datos\$Norte and Datos \$Altura t = 4.6321, df = 467, p-value = 4.701e-06 alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0 95 percent confidence interval: 0.1213443 0.2945419 sample estimates: cor 0.2095865
data: Datos\$Este and Datos\$Altura t = -22.6227, df = 467, p-value < 2.2e-16 alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0 95 percent confidence interval: -0.7643778 -0.6776112 sample estimates: cor -0.723844	data: Datos\$Norte and Datos\$Grav t = -5.6333, df = 467, p-value = 3.066e-08 alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0 95 percent confidence interval: -0.3357930 -0.1658198 sample estimates: cor -0.2527555
data: Datos\$Altura and Datos\$Gravedad t = -129.8838, df = 467, p-value < 2.2e-16 alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0 95 percent confidence interval: -0.9886786 -0.9837614 sample estimates: cor -0.9864396	

Las pruebas de Pearson muestran que el Valor P tiende a cero, por lo tanto la correlación es significativa. Por lo que $P < \alpha$ se rechaza la hipótesis nula. En ningún caso el intervalo de confianza pasa por el cero, por lo que sigue siendo significativa la correlación.

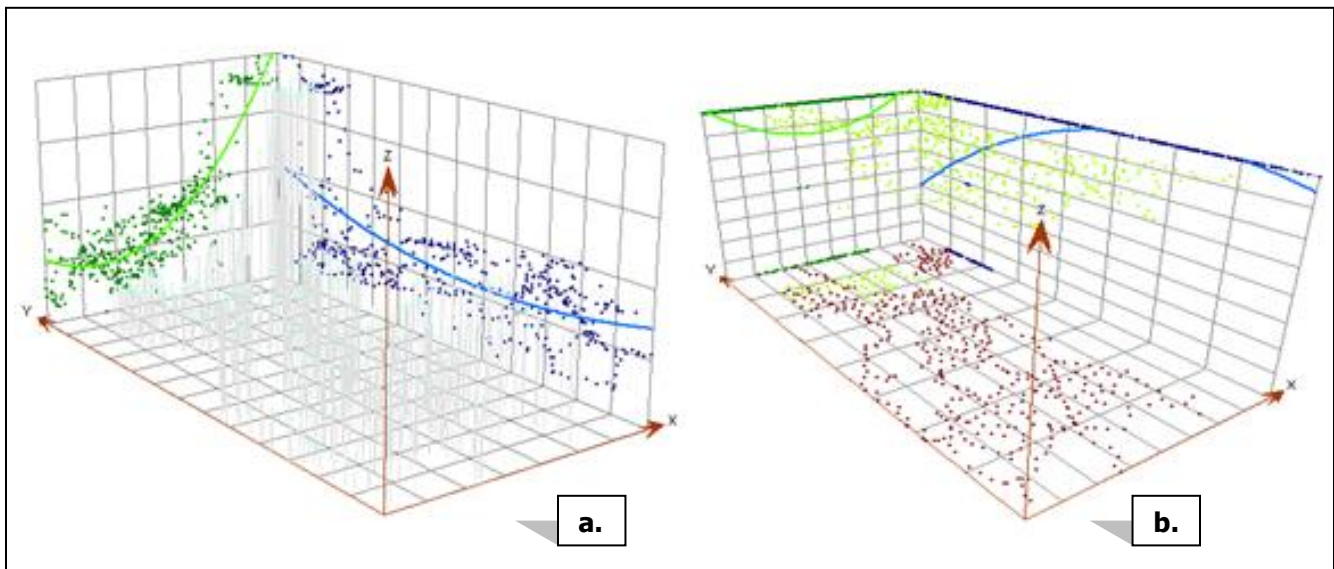
En el caso de la variable Altura, tanto como para Norte y Este el intervalo es positivo, al igual que para la variable de Gravedad ambos intervalos son negativos, indicando que se rechaza la hipótesis nula. Por lo que se concluye que para las dos variables con respecto a su localización geográfica existe tendencia y se puede suponer que no hay media estacionaria. En el gráfico de dispersión (Figura 3-7) se observa una ligera tendencia, con mayor atenuación hacia la dirección Este en las dos variables, corroborando el análisis anterior.

La relación inversamente proporcional de las variables estudiadas y una tendencia de estas dos variables hacia la coordenada Este, que realizado en el programa XL-STAT y mediante el test de Shapiro–Wilk arrojan una correlación mayor de acuerdo a los resultados de la Tabla 3-4.

Figura 3-7 Resumen de dispersiogramas**Tabla 3-4** Resultados de prueba Shapiro-Wilk

<code>shapiro.test(Datos\$Altura)</code> Shapiro-Wilk normality test	<code>shapiro.test(Datos\$Grav)</code> Shapiro-Wilk normality test
data: Datos\$Altura W = 0.8391, p-value < 2.2e-16	data: Datos\$Grav W = 0.8235, p-value < 2.2e-16

Otros gráficos realizados para determinar si hay tendencia y/o existencia de media estacionaria son los gráficos 3D (Figura 3-8), generados en ArcGis, los cuales se observa para las dos variables una ligera tendencia, con mayor atenuación hacia la dirección Este en la variable de altura, corroborando el análisis anterior del coeficiente de determinación y la no existencia de media estacionaria.

Figura 3-8 Gráficos 3-D de las variables altura (a) y gravedad (b)

Debido a que las variables no presentan estacionariedad se realiza un modelo de regresión cuyos resultados se presentan en la Tabla 3-5 con sus test de hipótesis (ANOVA) para las dos variables resumidos en la Tabla 3-6, obteniendo residuales según el modelo de regresión aplicado con graficas nuevas de dispersiogramas (Figura 3-9), para observar si se eliminó la tendencia y los datos presentan media estacionaria.

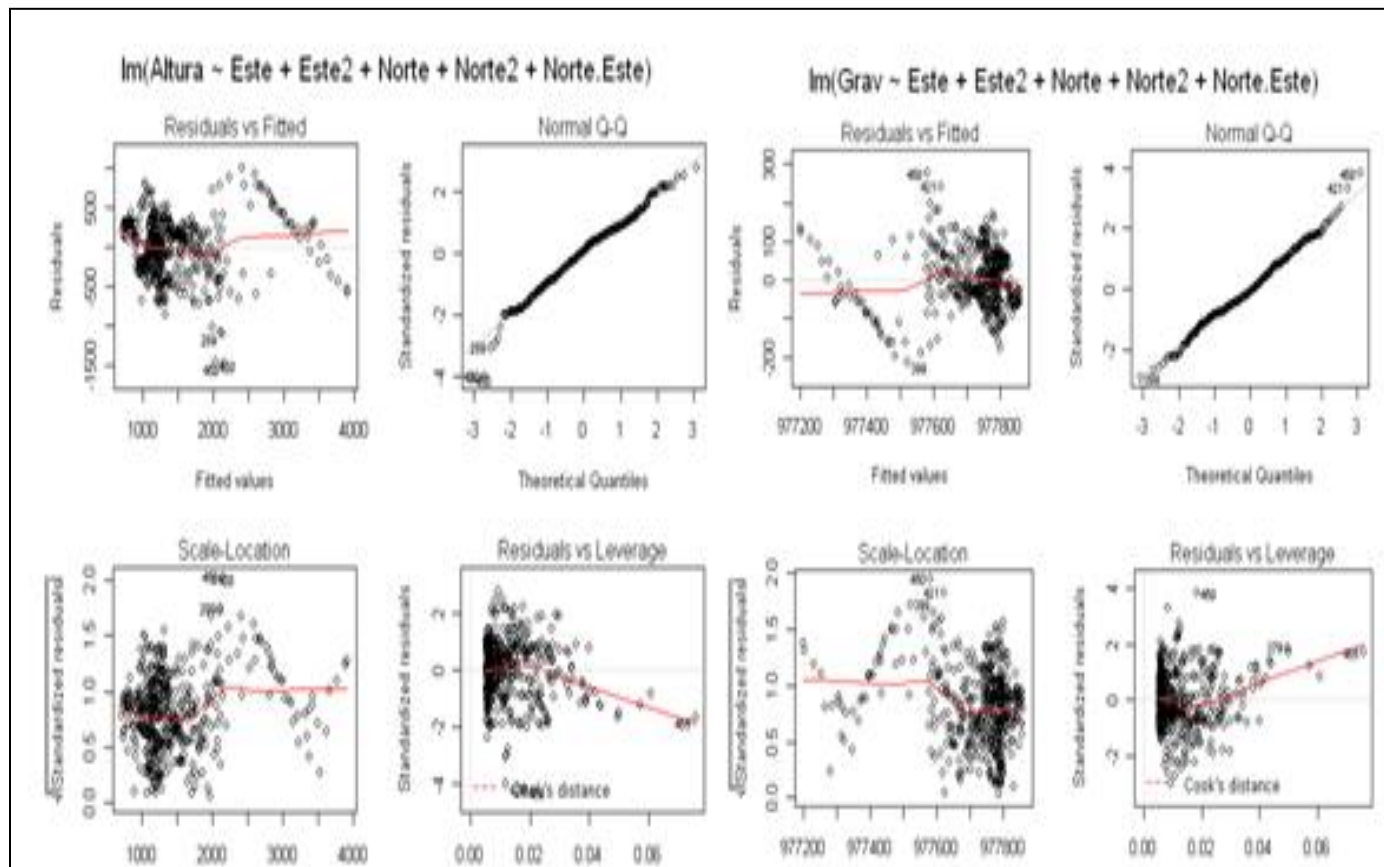
Tabla 3-5 Resumen de regresiones realizadas a las dos variables primarias

RegModel.1 Variable Altura lm(formula = Altura ~ Este + Este2 + Norte + Norte2 + Norte.Este, data = Datos)	RegModel.2 Variable Gravedad lm(formula = Grav ~ Este + Este2 + Norte + Norte2 + Norte.Este, data = Datos)																																																																																										
Residuals: <table><tr><th>Min</th><th>1Q</th><th>Median</th><th>3Q</th><th>Max</th></tr><tr><td>-1486.57</td><td>-243.93</td><td>28.07</td><td>243.28</td><td>1002.73</td></tr></table> Coefficients: <table><tr><th></th><th>Estimate</th><th>Std. Error</th><th>t value</th><th>Pr(> t)</th></tr><tr><td>(Intercept)</td><td>2.444e+06</td><td>1.529e+05</td><td>15.990</td><td>< 2e-16 ***</td></tr><tr><td>Este</td><td>-3.939e+00</td><td>3.083e-01</td><td>-12.777</td><td>< 2e-16 ***</td></tr><tr><td>Este2</td><td>1.543e-06</td><td>1.599e-07</td><td>9.650</td><td>< 2e-16 ***</td></tr><tr><td>Norte</td><td>-4.558e-01</td><td>1.188e-01</td><td>-3.838</td><td>0.000141 ***</td></tr><tr><td>Norte2</td><td>-1.789e-08</td><td>3.609e-08</td><td>-0.496</td><td>0.620330</td></tr><tr><td>Norte.Este</td><td>4.513e-07</td><td>7.339e-08</td><td>6.149</td><td>1.69e-09 ***</td></tr></table> --- Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 Residual standard error: 363.6 on 461 degrees of freedom Multiple R-squared: 0.7318, Adjusted R-squared: 0.7289 F-statistic: 251.6 on 5 and 461 DF, p-value: < 2.2e-16	Min	1Q	Median	3Q	Max	-1486.57	-243.93	28.07	243.28	1002.73		Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	(Intercept)	2.444e+06	1.529e+05	15.990	< 2e-16 ***	Este	-3.939e+00	3.083e-01	-12.777	< 2e-16 ***	Este2	1.543e-06	1.599e-07	9.650	< 2e-16 ***	Norte	-4.558e-01	1.188e-01	-3.838	0.000141 ***	Norte2	-1.789e-08	3.609e-08	-0.496	0.620330	Norte.Este	4.513e-07	7.339e-08	6.149	1.69e-09 ***	Residuals: <table><tr><th>Min</th><th>1Q</th><th>Median</th><th>3Q</th><th>Max</th></tr><tr><td>-214.483</td><td>-48.234</td><td>-5.831</td><td>53.048</td><td>275.980</td></tr></table> Coefficients: <table><tr><th></th><th>Estimate</th><th>Std. Error</th><th>t value</th><th>Pr(> t)</th></tr><tr><td>(Intercept)</td><td>4.405e+05</td><td>3.070e+04</td><td>14.349</td><td>< 2e-16 ***</td></tr><tr><td>Este</td><td>8.821e-01</td><td>6.191e-02</td><td>14.249</td><td>< 2e-16 ***</td></tr><tr><td>Este2</td><td>-3.503e-07</td><td>3.211e-08</td><td>-10.909</td><td>< 2e-16 ***</td></tr><tr><td>Norte</td><td>8.571e-02</td><td>2.385e-02</td><td>3.594</td><td>0.000361 ***</td></tr><tr><td>Norte2</td><td>6.333e-09</td><td>7.247e-09</td><td>0.874</td><td>0.382624</td></tr><tr><td>Norte.Este</td><td>-9.178e-08</td><td>1.474e-08</td><td>-6.227</td><td>1.07e-09 ***</td></tr></table> --- Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 Residual standard error: 73.02 on 461 degrees of freedom Multiple R-squared: 0.7442, Adjusted R-squared: 0.7414 F-statistic: 268.2 on 5 and 461 DF, p-value: < 2.2e-1	Min	1Q	Median	3Q	Max	-214.483	-48.234	-5.831	53.048	275.980		Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	(Intercept)	4.405e+05	3.070e+04	14.349	< 2e-16 ***	Este	8.821e-01	6.191e-02	14.249	< 2e-16 ***	Este2	-3.503e-07	3.211e-08	-10.909	< 2e-16 ***	Norte	8.571e-02	2.385e-02	3.594	0.000361 ***	Norte2	6.333e-09	7.247e-09	0.874	0.382624	Norte.Este	-9.178e-08	1.474e-08	-6.227	1.07e-09 ***
Min	1Q	Median	3Q	Max																																																																																							
-1486.57	-243.93	28.07	243.28	1002.73																																																																																							
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)																																																																																							
(Intercept)	2.444e+06	1.529e+05	15.990	< 2e-16 ***																																																																																							
Este	-3.939e+00	3.083e-01	-12.777	< 2e-16 ***																																																																																							
Este2	1.543e-06	1.599e-07	9.650	< 2e-16 ***																																																																																							
Norte	-4.558e-01	1.188e-01	-3.838	0.000141 ***																																																																																							
Norte2	-1.789e-08	3.609e-08	-0.496	0.620330																																																																																							
Norte.Este	4.513e-07	7.339e-08	6.149	1.69e-09 ***																																																																																							
Min	1Q	Median	3Q	Max																																																																																							
-214.483	-48.234	-5.831	53.048	275.980																																																																																							
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)																																																																																							
(Intercept)	4.405e+05	3.070e+04	14.349	< 2e-16 ***																																																																																							
Este	8.821e-01	6.191e-02	14.249	< 2e-16 ***																																																																																							
Este2	-3.503e-07	3.211e-08	-10.909	< 2e-16 ***																																																																																							
Norte	8.571e-02	2.385e-02	3.594	0.000361 ***																																																																																							
Norte2	6.333e-09	7.247e-09	0.874	0.382624																																																																																							
Norte.Este	-9.178e-08	1.474e-08	-6.227	1.07e-09 ***																																																																																							

Tabla 3-6 Test hipótesis ANOVA realizada a las variables primarias

Test de Hipotesis Anova Table (Type II tests) Response: Altura	Test de Hipotesis Anova Table (Type II tests) Response: Grav
<p>Sum Sq Df F value Pr(>F)</p> <p>Este 21587411 1 163.2595 < 2.2e-16 ***</p> <p>Este2 12313981 1 93.1271 < 2.2e-16 ***</p> <p>Norte 1947571 1 14.7289 0.0001414 ***</p> <p>Norte2 32493 1 0.2457 0.6203299</p> <p>Norte.Este 5000261 1 37.8156 1.687e-09 ***</p> <p>Residuals 60956940 461</p> <p>--- Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1</p>	<p>Sum Sq Df F value Pr(>F)</p> <p>Este 1082697 1 203.0354 < 2.2e-16 ***</p> <p>Este2 634634 1 119.0114 < 2.2e-16 ***</p> <p>Norte 68861 1 12.9133 0.0003614 ***</p> <p>Norte2 4073 1 0.7637 0.3826242</p> <p>Norte.Este 206789 1 38.7787 1.070e-09 ***</p> <p>Residuals 2458306 461</p> <p>--- Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1</p>

Se obtuvieron los residuales del modelo de regresión y se graficó de nuevo los dispersiogramas para saber si aún existía tendencia, presentados en la Figura 3-9.

Figura 3-9 Dispersiogramas de los residuales según regresión aplicada a las variables primarias

De los anteriores dispersiogramas de los modelos de regresión para las variables primarias se observa que hay media estacionaria, por lo que se acepta la siguiente solución del método de regresión para las variables de altura y gravedad:

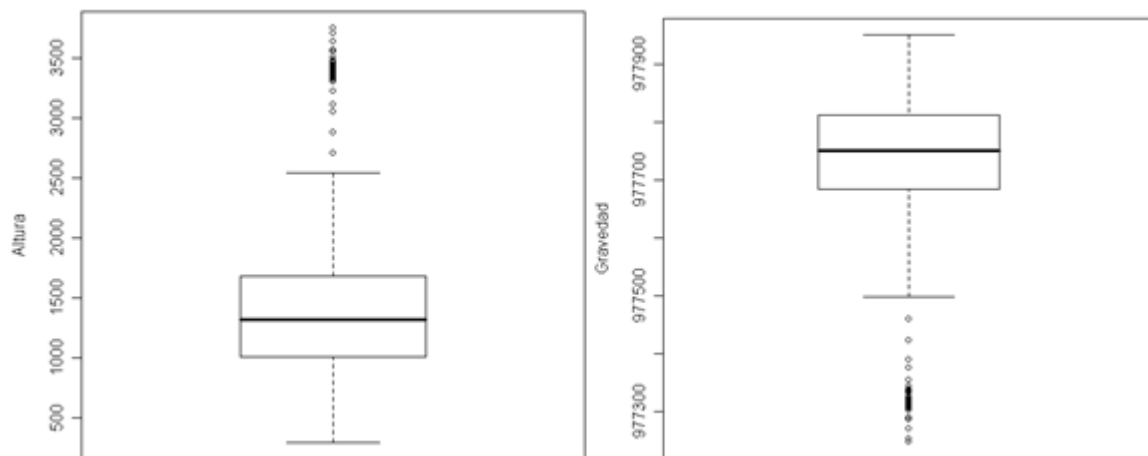
$$Y_{\text{Altura}} = \beta_0 + \beta_1 Y + \beta_1 Y^2 + \beta_2 XY + \epsilon = 2.444e+06 - 3.939e+00 + 1.543e-06 + 4.513e-0$$

$$Y_{\text{Grav}} = \beta_0 + \beta_1 Y + \beta_1 Y^2 + \beta_1 X + \beta_2 XY + \epsilon = 4.405e+05 + 8.821e-01 - 3.503e-07 + 8.571e-02 - 9.178e-08$$

■ Análisis de normalidad de los datos

El análisis de la normalidad se muestra con los gráficos del análisis descriptivo de los datos (Figura 3-6); y, con los gráficos de Cajas o Box Plot (Figura 3-10), de los cuales se observa que aunque hay datos atípicos o extremos, que se salen del diagrama, estos son producto del modelamiento de la superficie terrestre y de la gravedad para cada estación, por lo tanto no se van a eliminar ya que corresponden a los datos comprendidos a la subzonas hidrogeológicas en estudio.

Figura 3-10 Gráficos Box-Plot de las variables primarias



Se sigue conservando la simetría en el diagrama de cajas, sin los datos atípicos, corroborando la normalidad de los datos, observada también en los histogramas realizados para estas variables, indicando que hay dos tipos de secciones normales, debido a las diferencias de altura que presenta la zona de estudio y que por lo tanto no se puede establecer a todo el conjunto de los datos normalidad, indicando que no es

bueno utilizar un interpolador Kriging para los 467 datos, o que se debe realizar de acuerdo a las dos zonas normales que presenta los histogramas (Figura 3-6) correspondientes.

Según los resultados de la prueba de Kolmogorov-Smirnov los datos de altura y gravedad no son normales, lo que indica que los valores no tienden a una distribución Normal, debido a la presencia de datos atípicos que para estas dos variables y en esta zona de estudio se van a tener en cuenta sin que sean normales, por lo cual el modelamiento de estas variables se hicieron según los métodos determinístico como el de ponderación de distancia inversa (IDW) y el de Función de Base Radial (FBR) tal y como se observa en las Tablas 3-8 y 3-9.

Tabla 3-7 Resumen de estadísticas de las variables primarias por ponderación de distancia inversa –IDW–

Variable	Estadísticos	IDW				
	Validación cruzada	50 Vec.	30 Vec.	20 Vec.	15 Vec.	10Vec.
Elevación	Mean	-3,821	-0,4648	1,514	1,794	1,843
	Root Mean Square	180,3	168	159,2	151,6	144,9
Gravedad	Mean	1,463	0,6928	0,2354	0,09607	0,008999
	Root Mean Square	38,9	36,89	35,47	34,38	33,56

El método IDW se trabajó con una potencia óptima de 2 y un radio de 25750 m con la media y el error medio cuadrático con diferentes cantidades de vecinos, observándose en la Tabla 3-8 que la variable gravedad con 10 vecinos es la que mejor modelado presenta.

Tabla 3-8 Resumen de estadísticas de las variables primarias por base radial

Variable	Estadísticos	-Spline Totalmente Regularizada POe=0,00148; POg= 0,74279				-Multicuadrático Inverso- POe=2252; POg=29,954			
	Validación cruzada	30	20	15	10	30	20	15	10
Elevación	Mean	-0,3628	0,03947	-0,1598	0,277	-0,1145	0,3439	0,09959	0,5418
	Root Mean Square	119,7	119,1	118,4	118,5	119,9	119,3	118,2	118,3
Gravedad	Mean	0,4655	-0,2058	-0,5382	-0,6636	0,6206	-0,9321	-1,399	-1,374
	Root Mean Square	40,5	39,43	38,27	37,02	51,15	46,86	43,75	40,93

Para la Función de Base Radial (RBF) se tuvo en cuenta el Kernel utilizado, que para este caso, el mejor fue el correspondiente al Spline totalmente regularizada, con un valor de parámetro optimizado de 0,00148, utilizando 20 vecinos sin incluir adicionales, en el modelamiento de la variable de elevación.

La validación cruzada para la base radial de la Tabla 3-9 se muestreó con 30, 20, 15 y 10 vecinos y con un parámetro optimizado (P_{Oe} y P_{Og}) de acuerdo a los dos mejores kernel.

La Función de Base Radial es un interpolador determinístico exacto. Es mucho más flexible que IDW, sin embargo tiene más parámetros en sus decisiones. No hay ninguna evaluación de los errores de predicción.

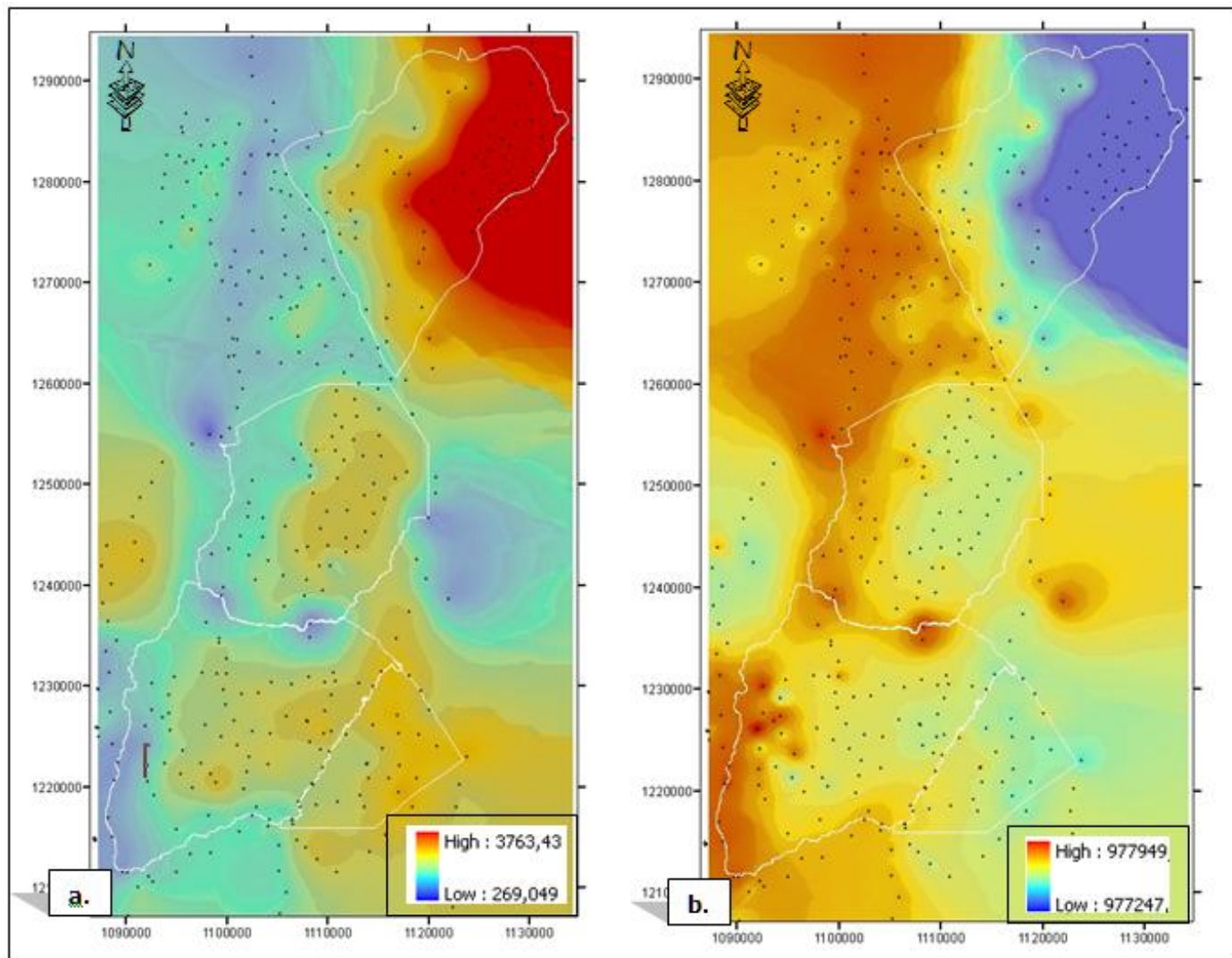
El método de base radial proporciona superficies de predicción que son comparables a la forma exacta de Kriging.

Esta Función de base radial no permite investigar la autocorrelación de los datos, por lo que es menos flexible y más automático que Kriging, y no hace suposiciones acerca de sus datos.

La Figura 3-11 muestra los mejores modelos de interpolación determinístico que pueden representar la superficie terrestre y el valor de gravedad en las zonas hidrogeológicas de estudio.

El estimativo de interpolación con Kriging no se realizó para estas variables ni sus semivariogramas respectivos, ya que no son los mapas correspondientes al estudio, sino son las variables principales y primarias con los datos directos tomados en cada estación gravimétrica utilizados para realizar los cálculos de anomalías gravimétricas, pertenecientes a la parte central del departamento de Santander, y se quería saber el comportamiento estadístico de estas variables.

Figura 3-11 Mapas de superficie (a- modelo de interpolación RBF –m.-); y, gravedad (b- modelo IDW –mGals-)



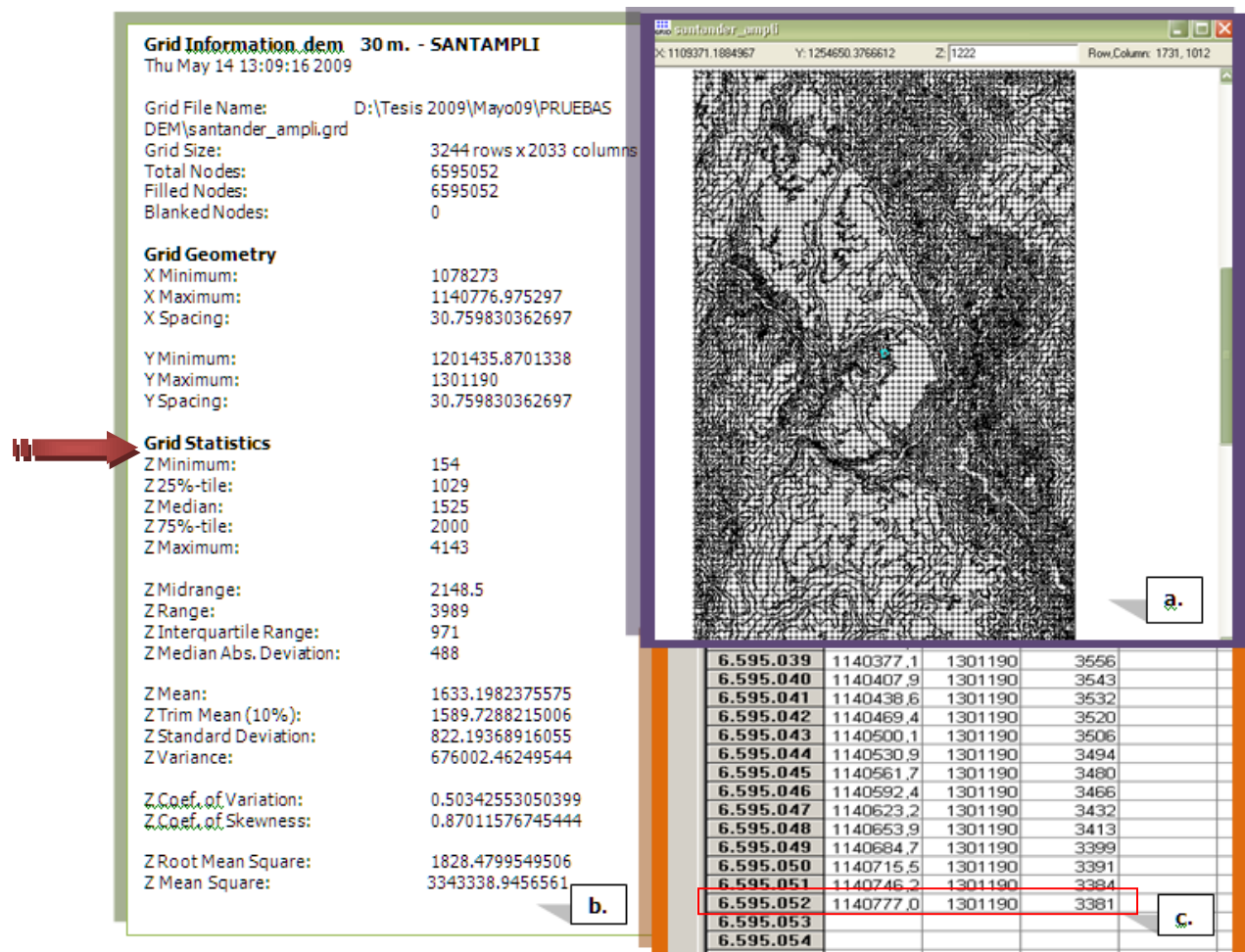
3.1.3 Análisis de los datos de altura del DEM -SRTM- de la zona de estudio y de los datos de imágenes radar

Para analizar los datos de altura del DEM-SRTM (de 30 m de resolución) de la zona de interés fue necesario recortar el DEM de la parte central del país y exportar los archivos originales a archivos de grilla (.grd), los cuales fueron explorados y trabajados en los programas especializados de Surfer y Erdas.

■ Datos de altura del DEM -SRTM- de la zona de estudio

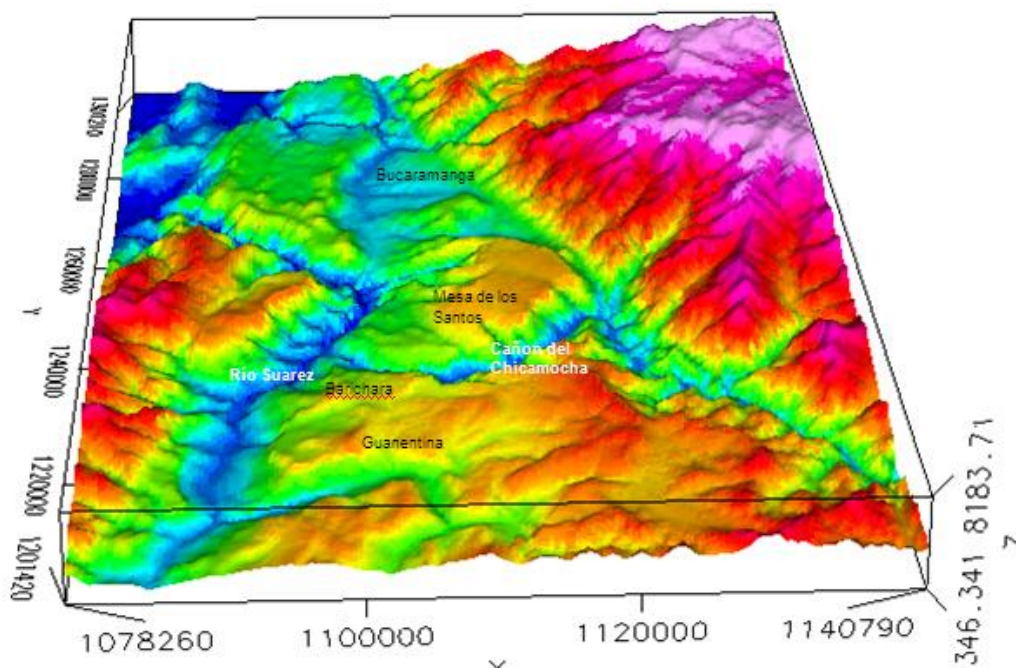
Las características de la imagen del Modelo Digital de Elevación –DEM- de 30 metros de resolución original se muestra con sus datos estadísticos en la Figura 3-12, en específico de la variable altura, información proporcionada desde la casa matriz y producto ortorectificado por el proyecto SRTM de la NASA para Colombia, que contiene 6'595.052 de datos de coordenadas con su correspondiente altura en metros sobre el nivel del mar, pertenecientes al sector de la zona de estudio.

Figura 3-12 Características de los datos del DEM-SRTM original del sector de la zona de estudio




En la Figura 3-13 se visualiza la superficie topográfica presentada mediante el bloquediagrama generado con los datos del DEM original, y en Tabla 3-10 se presenta el reporte estadístico presentando buena calidad de los datos geográficos según el archivo Ascii del DEM en mención.

Figura 3-13 Bloquediagrama del DEM-SRTM original mostrando la zona de estudio

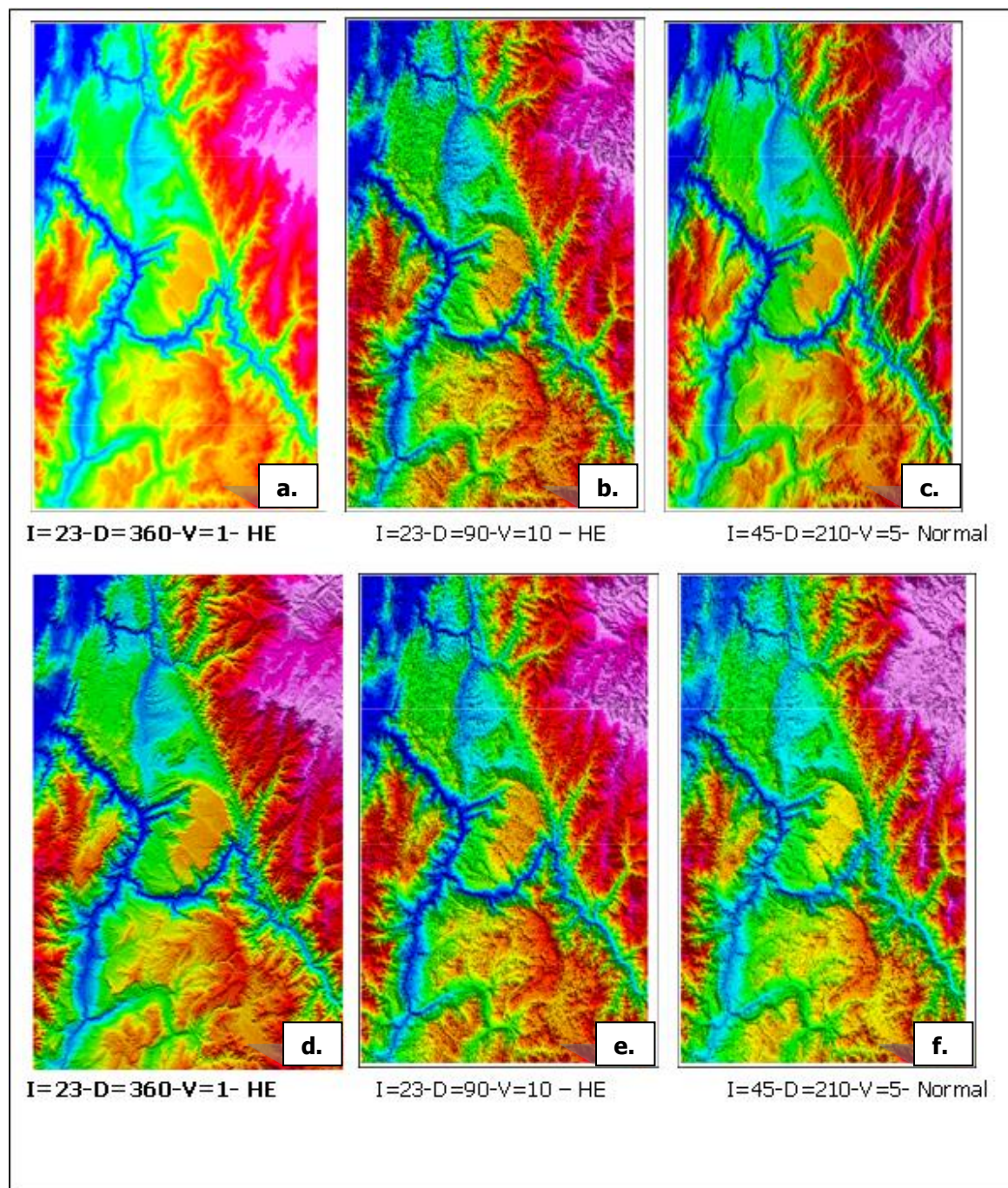


La Figura 3-14 contiene las pruebas realizadas con la imagen del DEM original, las cuales variaron el ángulo de incidencia (I), el ángulo de declinación (D), la escala vertical (V) y en algunas se realizaron con histograma ecualizado (HE); se experimentó con ángulos de incidencia de 23 y 45 grados debido a que estas imágenes de radar manejan este rango; y, los ángulo de declinación fueron perpendiculares entre 90 y 210 grados, según la misma dirección del pase orbital de 360. La imagen 3-14-a. corresponde a la original en donde se observa los límites topográficos, de la superficie terrestre del sector central del departamento de Santander, que se distinguen por medio del rango de colores, donde las alturas más bajas están representadas por los tonos azules, seguidas de tonalidades verdes y amarillas y las mayores alturas están representadas por los tonos rojo y fucsia.

Tabla 3-9 Reporte estadístico de los datos geográficos del DEM-SRTM original


Estadísticas	Este	Norte	Altura
Primera Fila de entrada	1	1	1
última Fila de entrada	6595052	6595052	6595052
Numero de valores	6595052	6595052	6595052
Numero de valores perdidos	0	0	0
Suma	7317374988842.74	8252473875036.61	10771027303
Mínimo	1078273	1201435.8701338	154
Máximo	1140776.975297	1301190	4143
Rango	62503.975297	99754.1298662	3989
Media	1109524.98764873	1251312.93506656	1633.2
Mediana	1109524.9876485	1251297.5551517	1525
1er Cuartil	1093898.9938243	1226351.3327276	1029
3er cuartil	1125150.9814728	1276243.7775759	2000
Error Estándar	7.02945346036731	11.2166988197815	0.32016
Intervalo de Confianza 95%	13.777726650584	21.9847262852214	0.62751
Intervalo de Confianza 99%	18.1064606807008	28.8919639759624	0.82466
Varianza	325882728.687174	829752064.613554	676000
Promedio de la desviación	15633.6799992765	24946.2224241385	632.64
Desviación Estándar	18052.2222645073	28805.4172789348	822.19
Coefficiente de variación	0.01627	0.02302	0.50343
Sesgo	0	0	0.87
Kurtosis	286212.631	286212.631	286212.631
Prueba Kolmogorov-Smirnov	0.057	0.057	0.094
Estadística K-S, alpha=.10	0	0	0
Estadística K-S, alpha=.05	0.001	0.001	0.001
Estadística K-S, alpha=.001	0.001	0.001	0.001

Las imágenes 3-14-b y 3-14-e. están generadas con ángulos de incidencia de 29°; ángulos de declinación perpendiculares a la dirección de la escena de radar; con una exageración vertical de 10 unidades y con una aplicación de ecualización. Estas imágenes generadas con las anteriores características representan una inversión de relieve y no son aptas para la aplicación de la corrección del terreno en los estudios de gravimetría.

Figura 3-14 Generación del óptimo mapa de superficie del DEM-SRTM

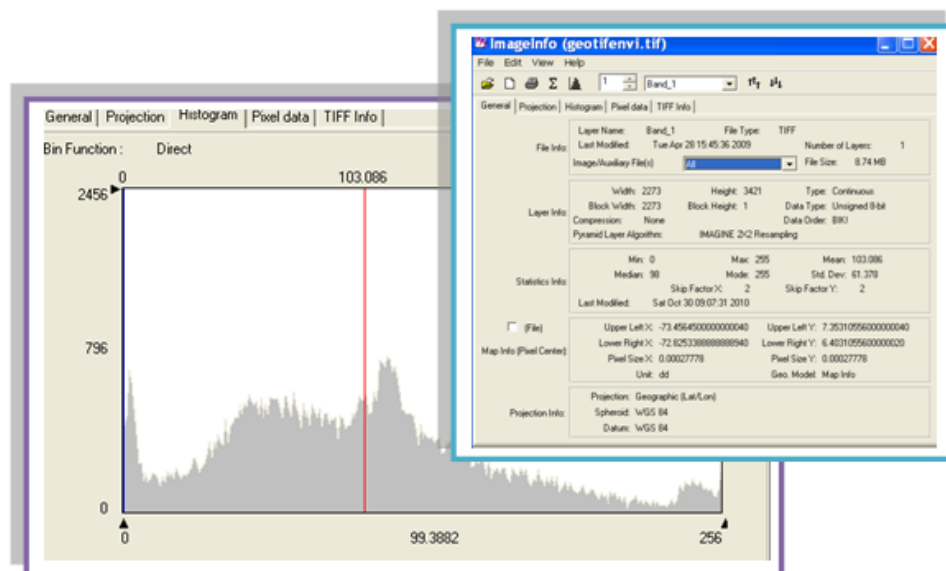
Las imágenes 3-14-c y 3-14-f están generadas con ángulos de incidencia de 45°; ángulos de declinación perpendiculares a la dirección de la toma de trayecto escena de radar; y sin ninguna aplicación de ecualización. La imagen que mejor representa

la superficie terrestre en estas dos figuras es la primera, ya que no hay exageración vertical y el ángulo de incidencia está mejor determinado con el ángulo de declinación, lo que hace resaltar mejor las estructuras geológicas de este sector; al contrario la segunda imagen contiene un componente de inversión de relieve debido al sentido perpendicular del ángulo de declinación, por lo cual tampoco sirve esta imagen resultado para la aplicación de la corrección del terreno en los estudios de gravimetría.

La imagen 3-14-d corresponde a una de las imágenes escogidas para trabajar en la aplicación de la corrección del terreno en los estudios de gravimetría, la cual los parámetros escogidos tiene características de un bajo ángulo de incidencia; su ángulo de declinación está dado en la misma dirección de la toma de trayecto de la escena de radar; sin necesidad de exageración vertical (debido a la buena definición de los rasgos topográficos); y, con la ampliación del rango de variación de píxeles según la aplicación del histograma de ecualización.

El histograma ecualizado de la Figura 3-15 representa como en la imagen del DEM-SRTM de la zona de estudio se amplió el rango de variación de píxeles para cada nivel de colores mediante la transformada por medio del histograma de la imagen y según su distribución uniforme y normal, este resultado de la ecualización maximizó el contraste de la imagen sin perder información de tipo estructural, conservando su entropía.

Figura 3-15 Histograma ecualizado de la imagen DEM-SRTM original de la zona de estudio

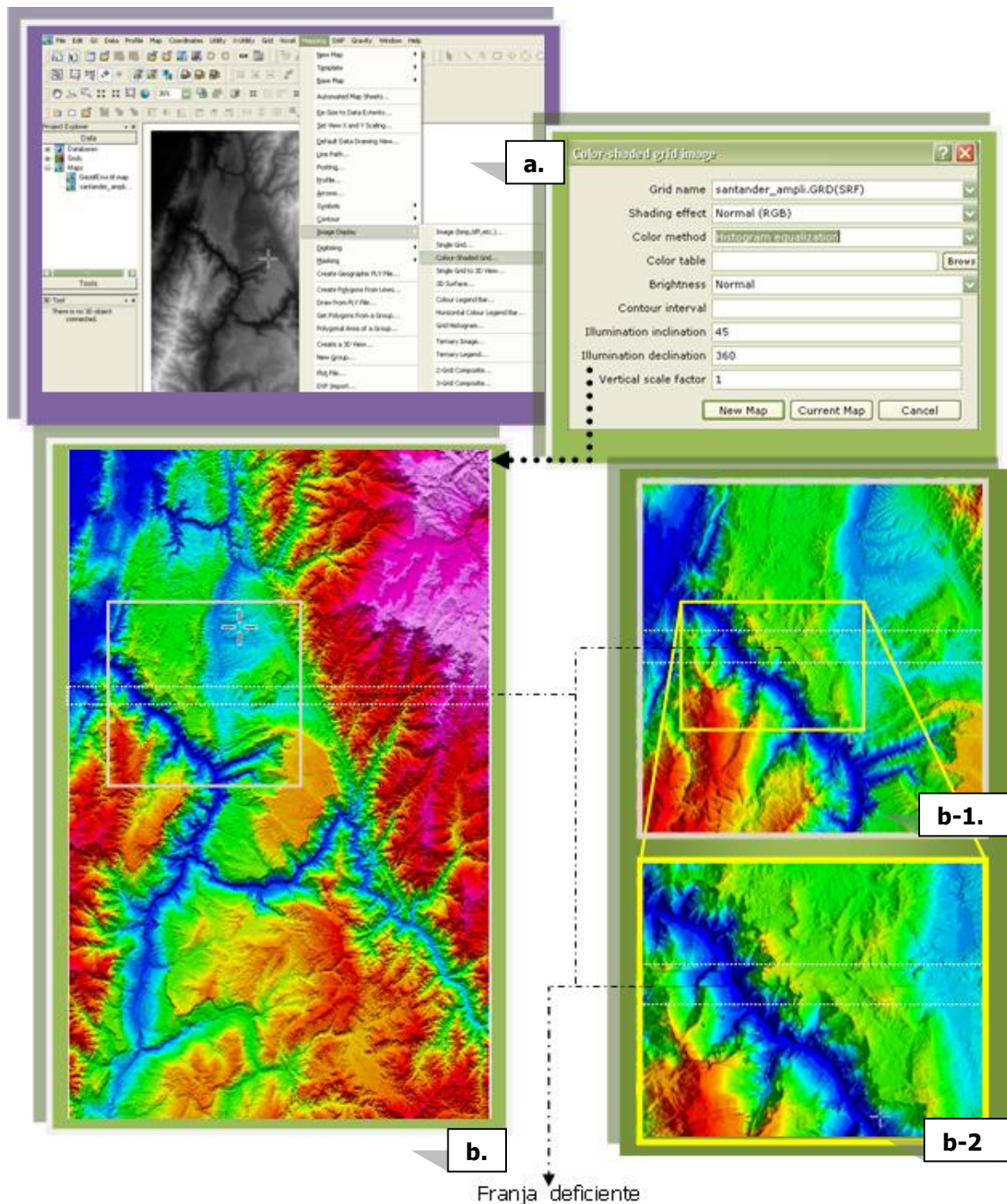


Por medio del análisis de procesamiento digital se logró detectar una franja y zona deficiente en la imagen del DEM original, mediante la realización de mapas y aplicaciones de procesos espaciales ejecutados por los programas especializados de *Erdas* y *Geosoft*, tal como se puede observar en la Figura 3-16. Esta franja de datos deficientes fue detectada por medio de la generación de los mapas de superficie, los mapas de sombra y diferentes combinaciones de imágenes mediante sinergismos de imágenes y anáglifos expuestos en Figura 3-17.

Se realizó un mapa de sombras con ángulos de iluminación de incidencia de 45° y de declinación de 360° , sin escala de exageración vertical y con histograma ecualizado, mediante el software especializado de *Geosoft* y utilizando los módulos de mejoramiento de imagen (Figura 3-16-a), el cual deja ver la mejor definición de la franja deficiente que corresponde una zona horizontal de aproximadamente 1.5 km de ancho como se aprecia a nivel regional en la Figura 3-16-b, a nivel más detallado en la Figura 3-16-c, y a nivel más local. Esta franja deficiente va de Occidente a Oriente muy cerca al sector de la población de Piedecuesta.

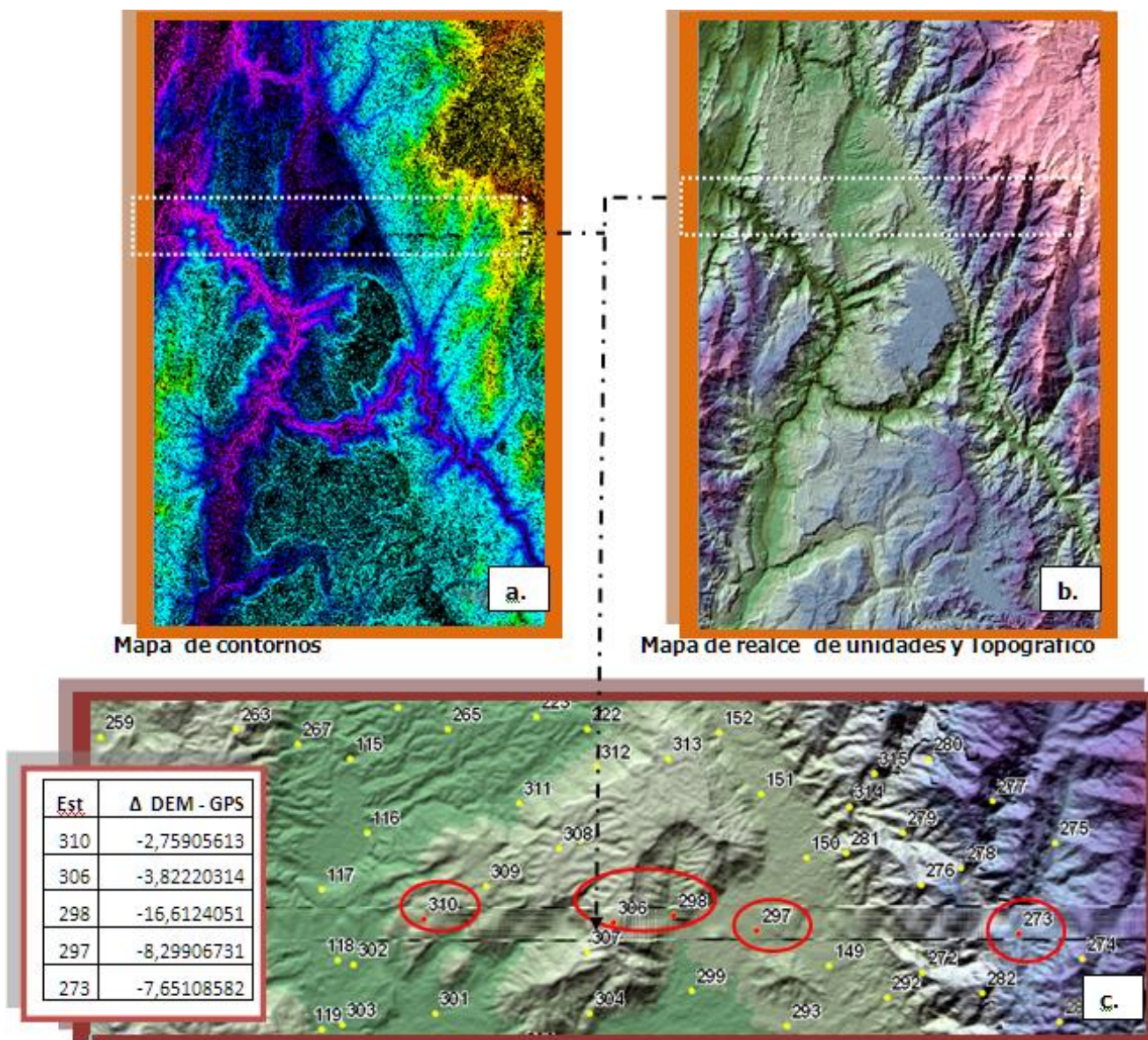
Con el software especializado de *Erdas* se generaron productos (Figura 3-17) en los cuales también se aprecia este déficit de datos en la misma zona anteriormente mencionada. Se realizó un mapa de contornos (imagen 3-17-a.) y un anáglifo con una imagen LandSat de la zona de interés combinada con la imagen DEM de radar, realzando las unidades geomorfológicas y la topografía allí presente (imagen 3-17-b.), la cual también deja visualizar, pero de forma menos resaltada, la franja deficiente de los datos anómalos de altura en este sector, que se muestra con mayor detalle y con la localización de las estaciones gravimétricas en la imagen 3-17-c. Cinco (5) estaciones gravimétricas están sobre esta franja (estaciones señaladas con puntos rojos) y la figura muestra la localización de las demás estaciones cercanas (correspondientes a los puntos amarillos). A estas estaciones se extrajo el dato de altura de la base del DEM de 30 m. de resolución y se comparó con la elevación del Sistema de Geoposicionamiento global –GPS– (resumen datos Figura 3-17-.c), las cuales las 3 estaciones de la parte Oriental están dando una diferencia alta y en diferentes zonas topográficas.

Figura 3-16 Procesamiento digital realizado a la imagen DEM-SRTM original en la zona de estudio



- a) Módulo para mejoramiento de la imagen DEM-SRTM original
- b) Generación del mapa optimo de superficie de la imagen DEM-SRTM original
 - b-1) Detección de franja deficiente
 - b-2) Detalle sector Norte de la franja deficiente

Figura 3-17 Diagrama de flujo de procesamiento digital y generación de mapas de superficie de la imagen DEM-SRTM original en la zona de estudio



- Mapa de Contornos
- Mapa de realce de unidades con sinergismo
- Localización y diferencia de alturas entre datos de franja deficiente del DEM-SRTM original y las estaciones GPS datos de recolectados en terreno.

■ Procesamiento digital realizado a las imágenes RadarSat-1

De acuerdo a los datos de los archivos CEOS de radar adquiridos (Figura 3-18) y a los archivos texto de las (3) tres imágenes RadarSat-1 disponibles (Tabla 3-10) en esta zona de estudio, se puede decir que corresponden a productos de tipo SGF, y a modos de haz diferentes, con un modo de toma para la imagen de la escena 17jan06_53271 estandar S-3 y wide-2 para las otras dos imágenes, por lo que se observan incompatibilidades entre los archivos para poder realizar procesos de Interferometría (Anexo G) propios para la generación de modelos digitales de elevación y/o modelos de superficie con datos de radar y poder aplicar técnicas SaR como InSaR, FinSaR, DinSaR y PolInSaR; además se observa que corresponden a órbitas diferentes (la escena 17jan06_53271 fue capturada de forma ascendente y para las otras dos imágenes RadarSat-1 de forma descendente, (Anexos D y E), por lo que no se podría en ningún caso realizar este tipo de procesamientos digitales y crear mapas altimétricos, además estas imágenes solo poseen una única polarización (HH) y los datos tanto de fase como de magnitud están unidos, lo que no permite desarrollar métodos polarimétricos que dejen realizar mapas que reflejen la altura de la superficie terrestre en esta zona. Solo se podría realizar y mediante relaciones geofísicas, de datos de decibeles relacionados al tiempo de viaje y referidos a los puntos de altura terrestre (según el modelo geoidal y sus relaciones con alturas ortométricas definidas para Colombia), pero que con solo una imagen y una polarimetría de cada tipo orbital no se logra establecer dicha relación.

Figura 3-18 Archivos CEOS de las imágenes SAR - RadarSat-1 de la zona de estudio

Nombre	Tamaño	Tipo	Fecha de modificación
17Jan06_53271_01	2 KB	Documento de texto	14/02/2005 04:04 a.m.
17Jan06_53271_01.nvol	1 KB	Archivo NVOL	14/02/2005 04:04 a.m.
17Jan06_53271_01.sard	149.842 KB	Archivo SARD	14/02/2005 04:05 a.m.
17Jan06_53271_01.sarl	91 KB	Archivo SARL	14/02/2005 04:04 a.m.
17Jan06_53271_01.sart	1 KB	Archivo SART	14/02/2005 04:04 a.m.
17Jan06_53271_01.vol	2 KB	Archivo VOL	14/02/2005 04:04 a.m.
17Jan06_53271_01_dg.est	2 KB	Archivo EST	27/03/2009 02:30 p.m.
20Jun00_24151_01	2 KB	Documento de texto	14/02/2005 02:27 a.m.
20Jun00_24151_01.nvol	1 KB	Archivo NVOL	14/02/2005 02:28 a.m.
20Jun00_24151_01.sard	312.940 KB	Archivo SARD	14/02/2005 02:29 a.m.
20Jun00_24151_01.sarl	91 KB	Archivo SARL	14/02/2005 02:27 a.m.
20Jun00_24151_01.sart	1 KB	Archivo SART	14/02/2005 02:27 a.m.
20Jun00_24151_01.vol	2 KB	Archivo VOL	14/02/2005 02:27 a.m.
20Jun00_24151_02	2 KB	Documento de texto	14/02/2005 02:37 a.m.
20Jun00_24151_02.nvol	1 KB	Archivo NVOL	14/02/2005 02:37 a.m.
20Jun00_24151_02.sard	318.399 KB	Archivo SARD	14/02/2005 02:38 a.m.
20Jun00_24151_02.sarl	91 KB	Archivo SARL	14/02/2005 02:37 a.m.
20Jun00_24151_02.sart	1 KB	Archivo SART	14/02/2005 02:37 a.m.
20Jun00_24151_02.vol	2 KB	Archivo VOL	14/02/2005 02:37 a.m.

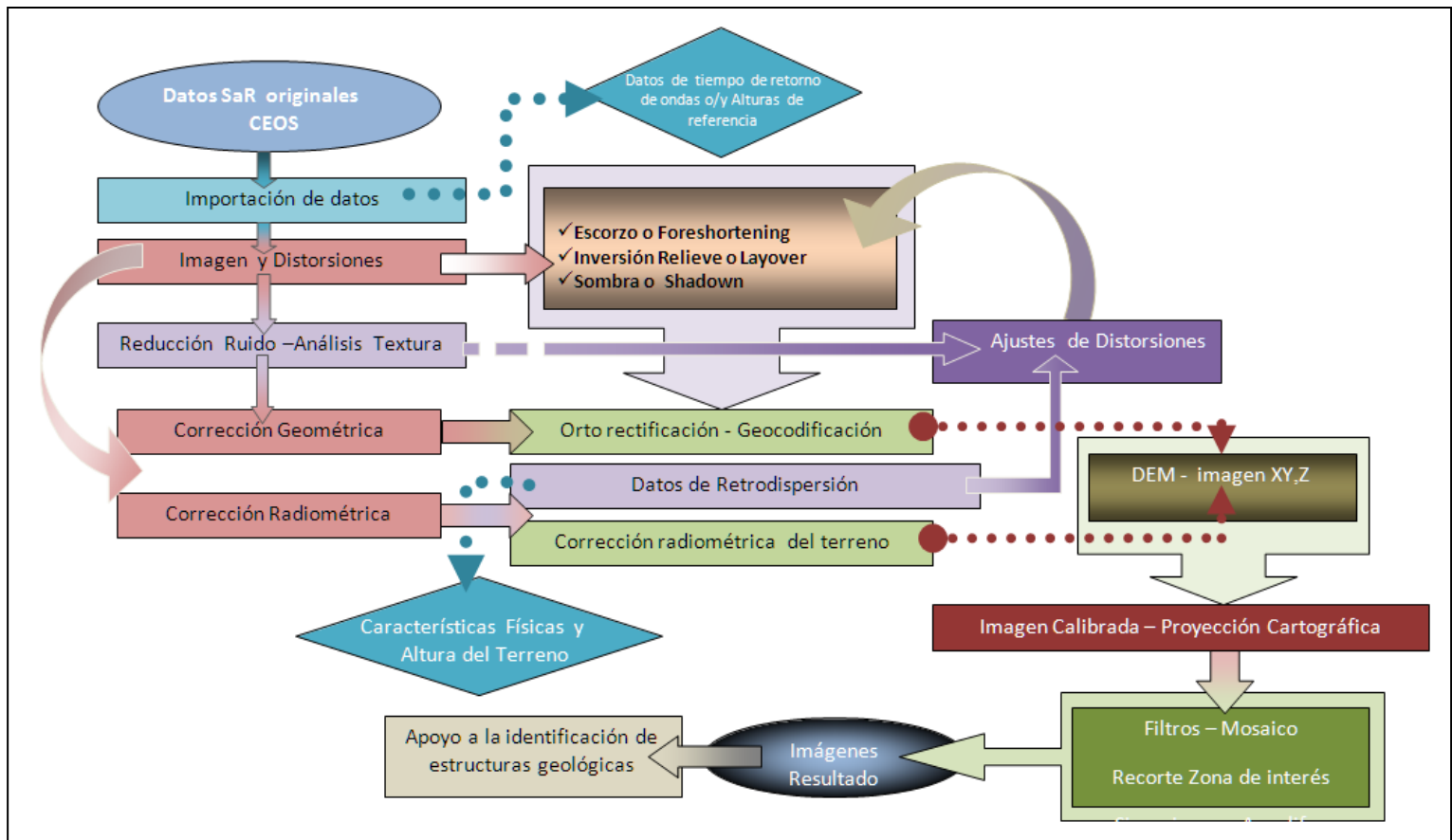
Tabla 3-10 Resumen de los datos de texto de las imágenes RadarSat-1

Imagen RadarSat-1 17jan06_53271		Imagen RadarSat-20Jun00_24151_01		Imagen RadarSat-1 20Jun00_24151_02	
RADARSAT 1 SCENE DESCRIPTION		RADARSAT 1 SCENE1 DESCRIPTION		RADARSAT 1 SCENE 2 DESCRIPTION	
SCENE_ID	P0439375	SCENE_ID	0438645	SCENE_ID	P0438646
RSI ORDER NUMBER	05-02397-001	RSI ORDER NUMBER	05-02394-002	RSI ORDER NUMBER	05-02394-002
GEOGRAPHICAL AREA	Colombia	GEOGRAPHICAL AREA	Colombia	GEOGRAPHICAL AREA	Colombia
SCENE START TIME	JAN 17 2006	SCENE START TIME	JUN 20 2000 10:37:57.841	SCENE START TIME	JUN 20 2000 10:38:18.923
23:01:58.802		SCENE STOP TIME	JUN 20 2000 10:38:20.961	SCENE STOP TIME	JUN 20 2000 10:38:42.432
SCENE STOP TIME	JAN 17 2006	ORBIT	24151	ORBIT	24151 DESCENDING
23:02:14.817		DESCENDING		ORBIT DATA TYPE	DEFINITIVE
ORBIT	53271	ORBIT DATA TYPE	DEFINITIVE	APPLICATION LUT	MIXED
ASCENDING		APPLICATION LUT	MIXED	BEAM MODE	SAR WIDE 2
ORBIT DATA TYPE	DEFINITIVE	BEAM MODE	SAR WIDE 2	PRODUCT TYPE	PATH IMAGE (SGF)
APPLICATION LUT	MIXED	PRODUCT TYPE	PATH IMAGE	FORMAT	RADARSAT CEOS
BEAM MODE	SAR STANDARD	(SGF)		# OF IMAGE LINES	12581
3		FORMAT	RADARSAT	# OF IMAGE PIXELS	12861
PRODUCT TYPE	ATH IMAGE (SGF)	CEOS		PIXEL SPACING	12.500 m
FORMAT	RADARSAT CEOS	# OF IMAGE LINES	12371	SCENE CENTRE	06°25'N 072°52'W
# OF IMAGE LINES	8572	# OF IMAGE PIXELS	12855	CORNER COORDINATES:	
# OF IMAGE PIXELS	8853	PIXEL SPACING	12.500 m	7°16'46.06" N	6°58'36.02" N
PIXEL SPACING	12.500 m	SCENE CENTRE	07°41'N	73°26'22.67"W	72°00'59.34" W
SCENE CENTRE	06°54'N 072°47'W	072°36'W			
CORNER COORDINATES:		CORNER COORDINATES:		5°53'22.27" N	5°35'03.47" N
7°16'44.87" N	7°29'15.12" N	8°31'32.20" N	8°13'29.99" N	73°44'01.35"W	72°18'51.85"W
73°22'28.00"W	72°23'39.24"W	73°10'37.85"W	71°45'00.16"W		
		7°09'31.24" N	6°51'20.65" N		
6°19'51.44" N	6°32'25.64" N	73°27'53.83"W	72°02'32.74"W		
73°10'18.69"W	72°11'36.93"W				
For information on RADARSAT CEOS format see README.TXT		For information on RADARSAT CEOS format see README.TXT		For information on RADARSAT CEOS format see README.TXT	
(c) Canadian Space Agency 2006 Agence spatiale canadienne. Processed and distributed by RADARSAT International Inc., a subsidiary of MDA.		(c) Canadian Space Agency 2000 Agence spatiale canadienne. Processed and distributed by RADARSAT International Inc., a subsidiary of MDA.		(c) Canadian Space Agency 2000 Agence spatiale canadienne. Processed and distributed by RADARSAT International Inc., a subsidiary of MDA.	
Use of the data and the trademarks associated herewith are governed by the MDA General Terms of Sale and the LicenseAgreement and is subject to the applicable satellite copyrights. Please see		Use of the data and the trademarks associated herewith are governed by the MDA General Terms of Sale and the LicenseAgreement and is subject to the applicable satellite copyrights. Please see		Use of the data and the trademarks associated herewith are governed by the MDA General Terms of Sale and the LicenseAgreement and is subject to the applicable satellite copyrights. Please see	
http://www.rsi.ca/about/legal/licence.asp		http://www.rsi.ca/about/legal/licence.asp		http://www.rsi.ca/about/legal/licence.asp	

Luego se desarrolló para este proyecto un esquema de procesamiento digital representado en la Figura 3-19, para las tres imágenes anteriormente mencionadas con las siguientes etapas de procesamiento:

- ✓ Importación de datos de radar y despliegue de la imagen.
- ✓ Procesos de supresión de ruido, corrección radiométrica, corrección geométrica y/o geocodificación.
- ✓ Elaboración de mosaico (en el caso de las imágenes del año 2000), aplicación de filtros, ecualizaciones, recorte de la zona de interés y generación de sinergismos-anáglifos entre el DEM y las imágenes de RadarSat-1.

Figura 3-19 Diagrama de flujo de procesamiento digital propuesto para las imágenes RadarSat-1



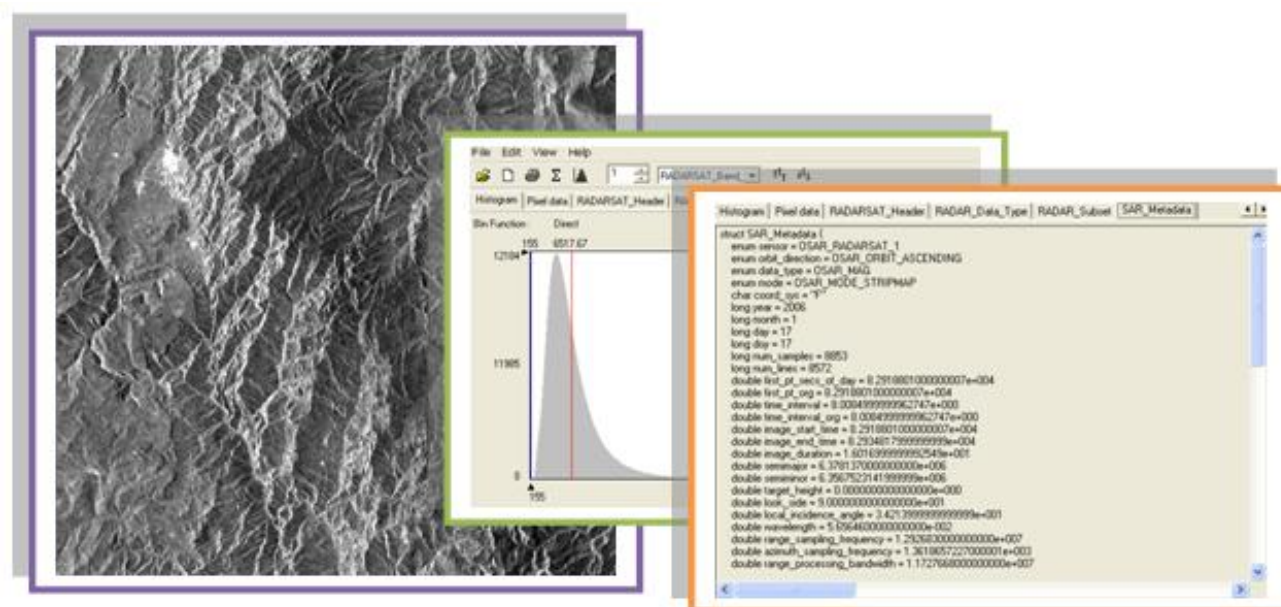
La importación de los datos se realizó mediante el módulo de importación del software *Erdas*, mediante el cambio siempre de nombre de sus archivos CEOS, según lo indica la Tabla 3-11 y el despliegue de una imagen se observa en Figura 3-20. El programa especializado sarscape de *ENVI* la importación se genera con la extensión de apertura de datos de SFG y sus productos originales de lectura y compresión de datos.

Tabla 3-11 Conversión de nombres de archivos para importación de una imagen RadarSat-1

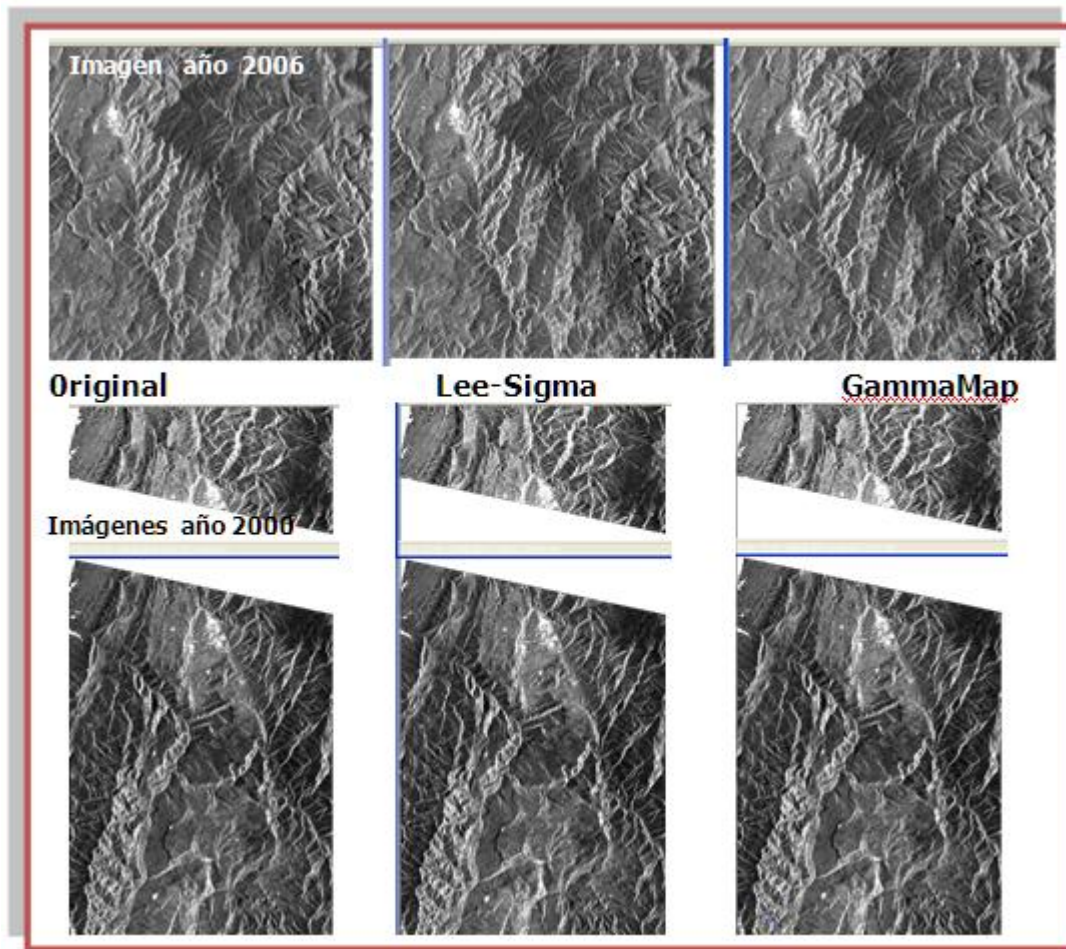
Nombre y Extensión Original (CEOS)	=> Cambio de nombre
17jan06_53271.nvol	=> nul_vdf.001
17jan06_53271.sard	=> dat_01.001
17jan06_53271.sarl	=> lea_01.001
17jan06_53271.sart	=> tra_01.001
17jan06_53271.vol	=> vdf_dat.001

Existen numerosas técnicas para extraer información contenida en imágenes con speckle, entre las cuales las estadísticas proveen los mejores modelos y herramientas para el procesamiento y análisis de imágenes ruidosas.

Figura 3-20 Despliegue de la imagen RadarSat-1 - 17jan06_53271- y sus características

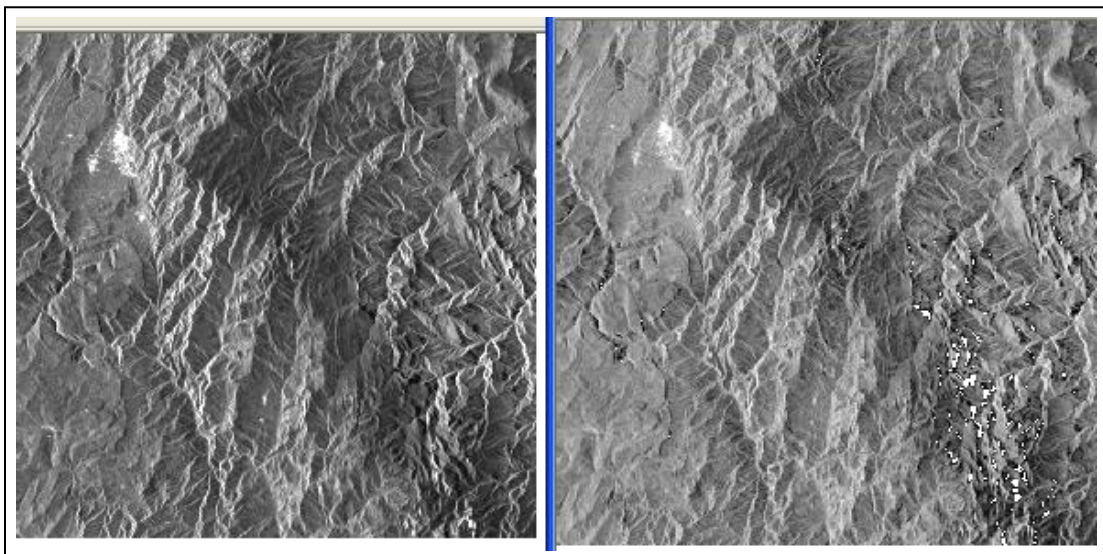


El procedimiento usual para la supresión de ruido consiste en proponer un modelo, contrastar la hipótesis con datos reales (etapa muchas veces evitada por la necesidad de obtener resultados rápidos y por la tradición de considerar la verdadera “distribución Gaussiana”) y, una vez aceptado el modelo, hacer inferencia acerca de los parámetros desconocidos del mismo. En este caso en la Figura 3-21 se muestra para cada imagen de radar el mejor modelo para la verdad (no observada) del terreno como una variable aleatoria que sigue una ley recíproca con los filtros Lee-Sigma y GammaMap. Este último modelo lleva a la distribución a (0) cero para el retorno, con coeficiente de variación entre 0.18 y 0.2. La versión iterativa del filtro se deriva para el formato de amplitud y fase, con aplicación y comparación usando datos reales derivados de DEM-SRTM original para su corrección geométrica. Luego en la Figura 3-21 se observa que la imagen RadarSat-1 del año 2006 y a las imágenes RadarSat-1 del 2000 en dirección de rango y retrodispersión no tiene cambios significativos, indicando un anterior filtrado por ruido desde el preprocesamiento.

Figura 3-21 Supresión de ruido –Speckle- realizado a las imágenes referencia

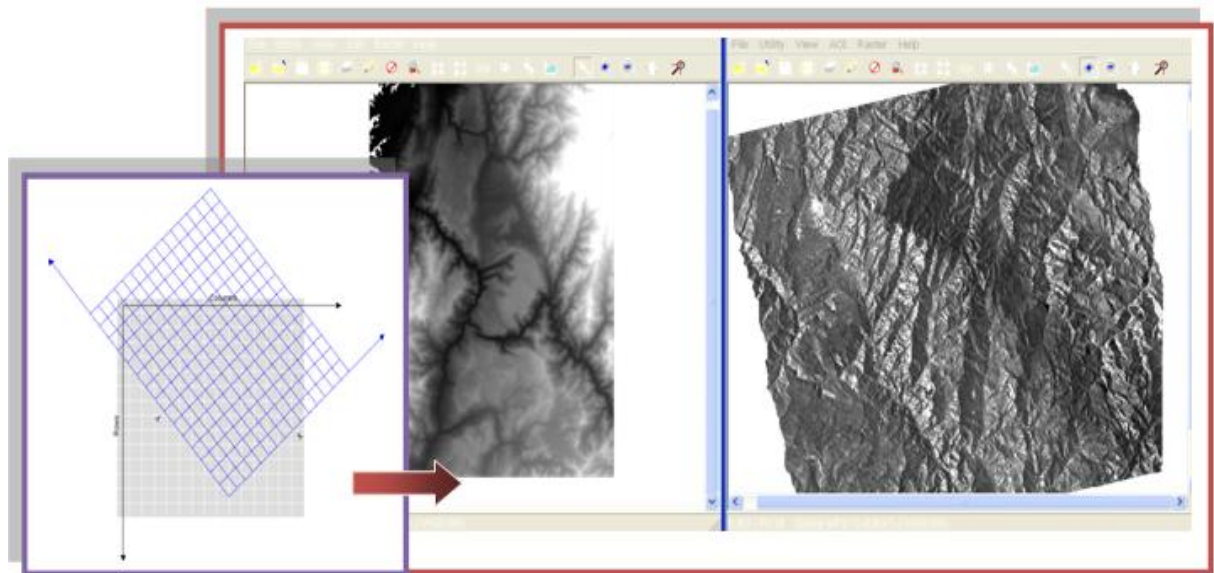
La supresión de ruido también se realizó durante todo el procesamiento siguiente con el fin de mejorar la textura de las imágenes, tanto originales como geocodificadas, por lo que se procedió a realizar las correcciones radiométricas primero, ya que esta zona de interés presenta gran variabilidad de altura, con coberturas de diferente material rocoso y de suelo, que son reflejadas en los datos de retrodispersión y que se pueden visualizar en los respectivos despliegues de las imágenes.

La imagen mejor calibrada radiométricamente fue la del año 2006 (Figura 3-22), con una dirección de azimuth de 348° y un centro de incidencia de 23° en una dirección de vista de izquierda a derecha, para este proceso se utilizó la imagen complementaria de incidencia previamente realizada con el DEM-SRTM, y con índices de retrodispersión.

Figura 3-22 Corrección radiométrica de la imagen RadarSat-1 del año 2006

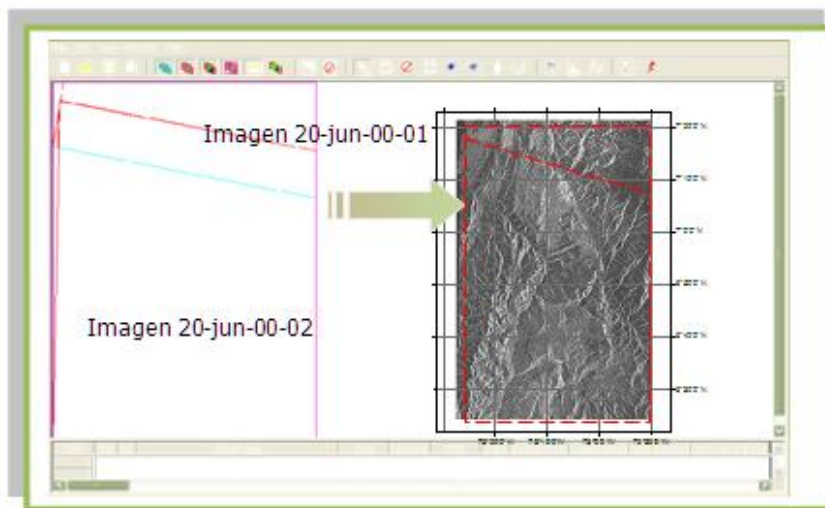
El procesador de formación SAR es una implementación del algoritmo de gama Doppler, su modo de depuración se ha ampliado en los diferentes programas especializados para permitir al usuario manipular todo el proceso paso a paso, y se describe con más detalle en el Anexo H. En el algoritmo gama Doppler los datos fuera de foco SAR se comprimen en el rango y en la dirección del acimut mediante el uso efectivo de la Transformada Rápida de Fourier (FFT).

El método más simple de rectificación para una imagen radar es la geocodificación. La opción de codificación geográfica de una imagen SAR realiza la corrección de altura basada en el supuesto de un buen esferoide. La geocodificación se trabaja en conjunto con el campo vertical. El valor en el campo vertical debe ajustarse a la elevación promedio de la zona definida por la imagen, un subconjunto de la imagen, o una característica específica de su interés. El DEM-SRTM posee las mismas unidades que la imagen. Las tres dimensiones (X, Y y Z) por lo cual se mide en la misma unidad, de metros. El DEM de referencia está en unidades de coordenadas geodésicas y con datum de WGS84 por lo que se procedió a utilizar esta forma de proyección y no reproyectarlo a coordenadas planas (Figura 3-23).

Figura 3-23 Proceso de geocodificación de imágenes RadarSat-1

La calibración y corrección de distorsiones de estas imágenes RadarSat-1 dependieron de factores como el pase orbital del sensor y ángulo de incidencia principalmente, además de las características geodésicas de datum y proyección para la calibración de las correcciones geométricas, sin embargo para la calibración radiométrica esta depende del modo de transformación de los datos de entrada y del análisis de textura de los datos retrodispersados por lo que para la imagen del año 2006 se requirió primero realizar la corrección radiométrica y luego realizar la geocodificación como parte de la calibración geométrica y de georeferencia de la misma.

La composición para las imágenes del año 2000 que cubren partes de la zona de interés, aplicando la técnica de mosaico y empalme para crear una única imagen como producto, fue el proceso digital llevado a cabo tal como se presenta en la Figura 3-24, y cuyo resultado se visualiza en la Figura 3-26.

Figura 3-24 Proceso de unión de imágenes denominado Mosaico

Para el mejoramiento de las imágenes se varió el dominio espacial de las imágenes mediante el empleo de la distribución gráfica y las frecuencias relativas de sus tonalidades, por medio de la ecualización de los histogramas, mejorando el contraste y el brillo de cada una de las imágenes radarmétricamente calibrada y/o geoméricamente corregida, conservando su entropía, es decir dejando la información de tipo estructural correspondiente a las características físicas y al relieve de la superficie en la zona estudiada.

Se observa junto con los resultados de procesamiento digital de cada etapa en la Figura 3-25 la imagen final de la escena correspondiente a Enero 17 de 2006 y denominada 17jan06_53271, con todos los procesos generados de acuerdo al esquema planteado en la Figura 3-19 con correcciones geométricas de distorsiones normales de captura. Y en la Figura 3-26 se observa los procesos realizados a las escenas pertenecientes a la zona de estudio y del año 2000 denominadas 20Jun00_24151_01 y 20Jun00_24151_02, cuyas zonas son contiguas y extensas, registrándose el resultado del procesamiento para estas dos imágenes con la realización del proceso de unión mediante un mosaico creando una sola imagen y solo del sector de interés.

Figura 3-25 Resultados de procesamiento planteado para los datos del sensor RadarSat-1 y creación de imagen para el año 2006

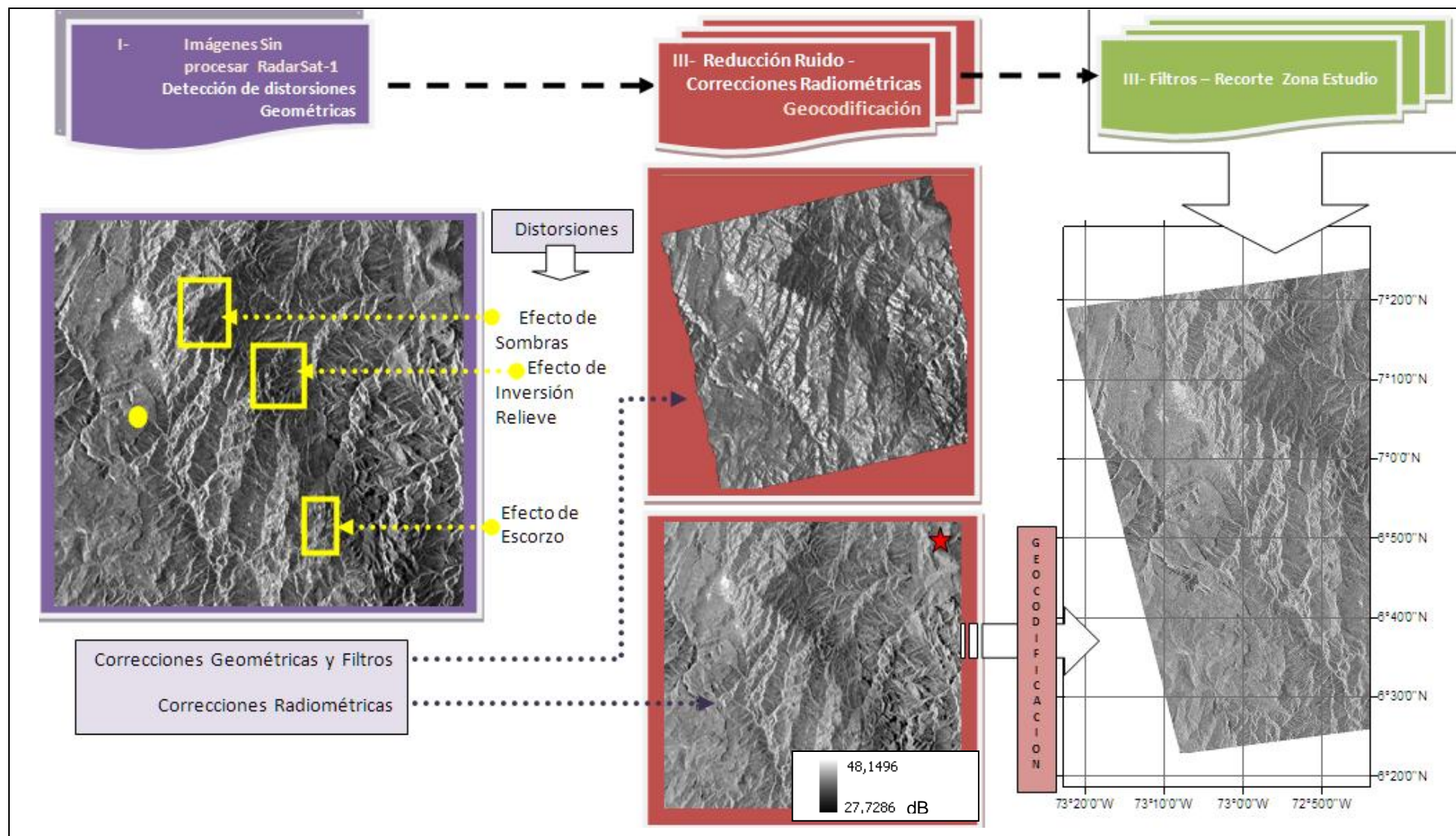
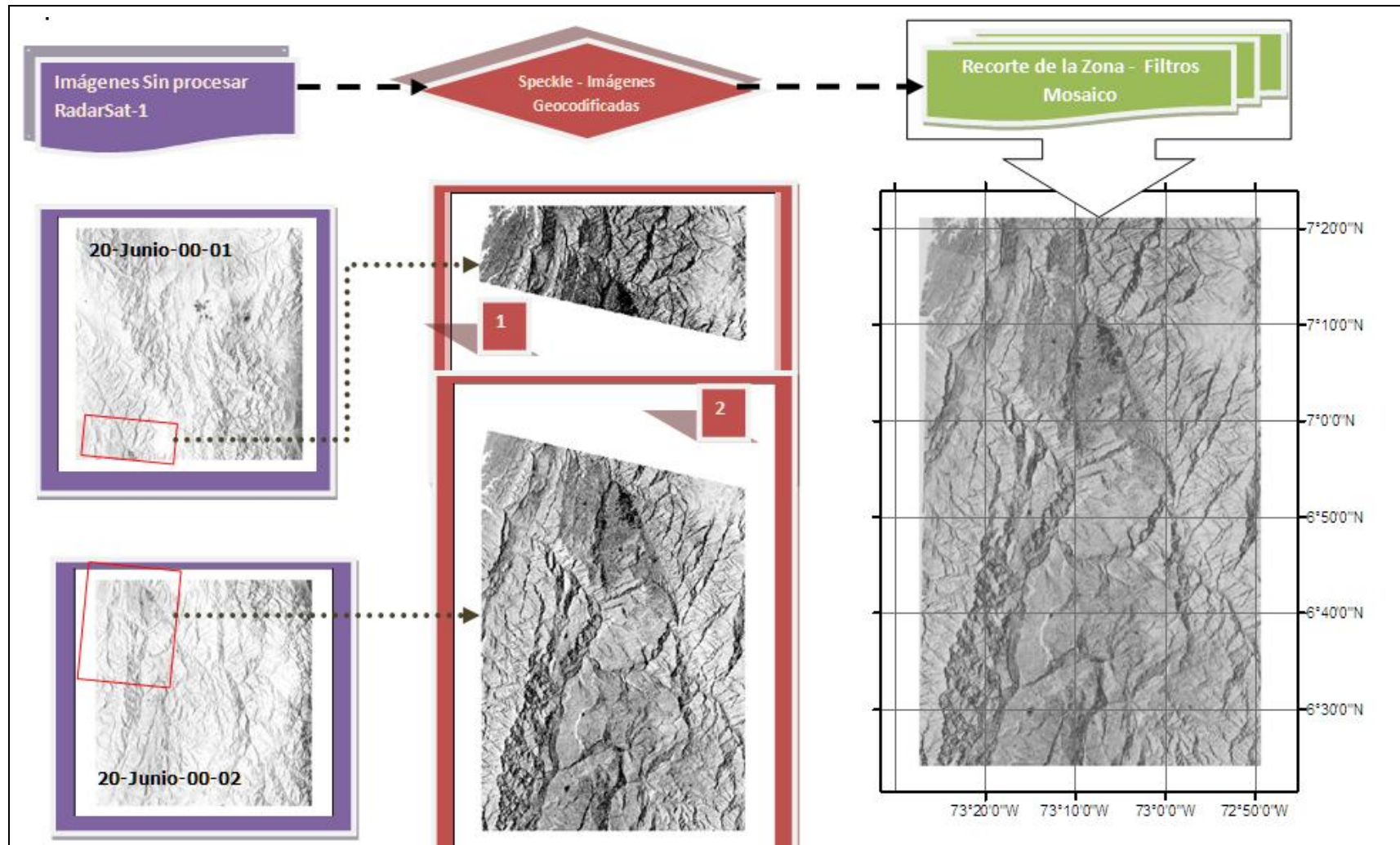


Figura 3-26 Resultados de procesamiento planteado para los datos del sensor RadarSat-1 y creación de la imagen para el año 2000



El anterior procesamiento digital y las características de las imágenes de RadarSat-1, no poseen la suficiente descripción numérica para ser desarrollado un análisis y modelado de datos de elevación de la superficie del terreno, de tal manera que los resultados presentados sirvieron para el apoyo en la identificación y visualización de estructuras geológicas (Figura 3-27), de lineamientos de fallas y presencia de pliegues, corroborados posteriormente por estudios especializados de geología estructural aplicado a evaluar las zonas potenciales de agua subterránea para la zona central del departamento de Santander ejecutado por el grupo de hidrogeología de la subdirección de recursos de subsuelo del Instituto Colombiano de Geología y Minería –INGEOMINAS.

La visualización geológica de las estructuras y geomorfología de la zona de interés se logro mediante el mapa de realce y la combinación de la imagen que contiene el valor de altura (como es la del DEM-SRTM), con las imágenes RadarSat-1 que contienen estas expresiones y características del terreno.

De acuerdo a que las imágenes de origen radar trabajadas para este proyecto no tienen el mismo tamaño de pixel; No presentan ni el mismo tipo, ni el mismo nivel de ruido; y, No están co-registradas, se debió estandarizar a un mismo formato, y referirlas a un sistema de coordenadas común (datum WGS-84 y proyectadas a zona Colombia-Bogotá) mediante sinergismos, y realizar la combinación de imágenes radar y ópticas. Para formar mapas de realce visual se llevo a cabo por medio de combinación de bandas y de transformaciones al espacio de color de una imagen LandSat, el DEM de 30 m resolución y las imágenes Rasdarsat_1.

3.1.4 Validación de datos de altura con imágenes procesadas y creación de mapas de superficie

Para la validación y generación de un mapa de alturas corregido, representando la superficie de terreno de las subzonas de estudio, utilizado en la corrección topográfica del estudio gravimétrico, correspondiente a la parte central del departamento de Santander, con los valores de contrastes de alturas entre los 467 datos directos, tomados con GPS y los datos extraídos y proporcionados del DEM-SRTM.

Figura 3-27 Estructuras geológicas y procesamiento digital de imágenes ópticas y radar para el año 2000 (a) y el año 2006 (b)

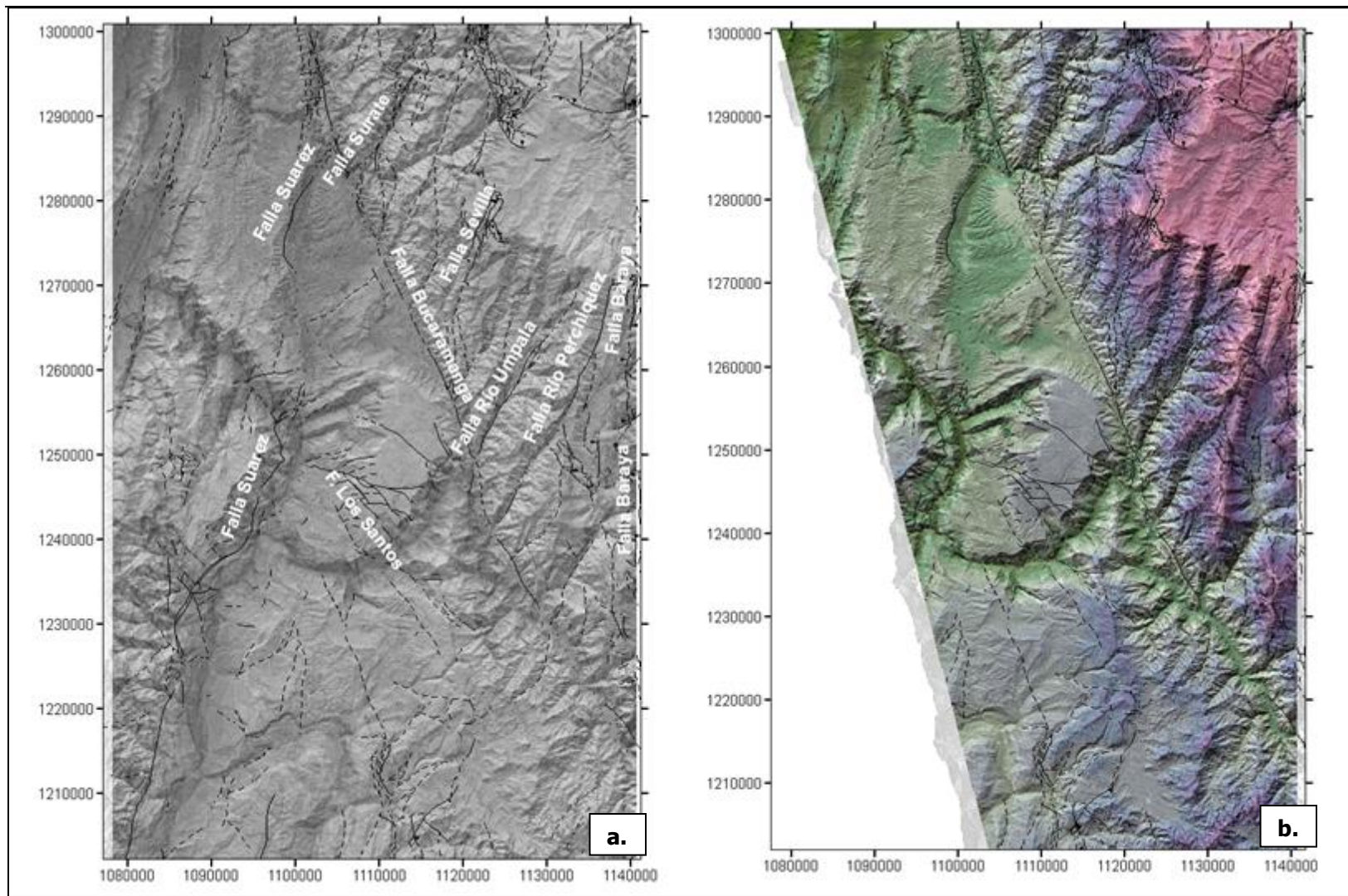
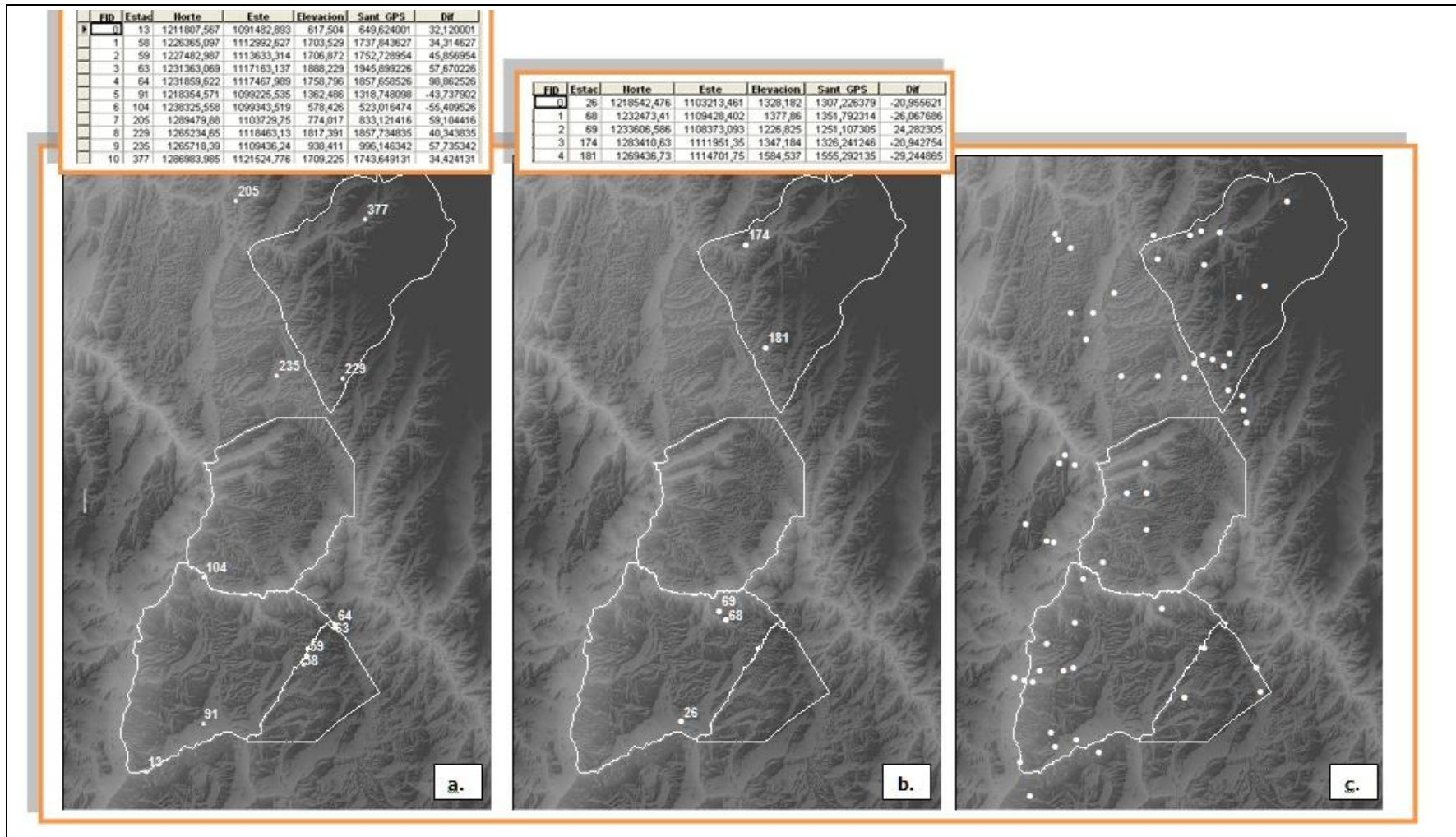


Figura 3-28 Localización de las estaciones excluidas para la validación de los datos con diferencias mayores a $\pm 30\text{m}$ (a), entre $\pm 20\text{m}$ a $\pm 30\text{m}$ (b); y, entre $\pm 10\text{m}$ a $\pm 20\text{m}$ (c) de los datos de alturas comparadas según el DEM-SRTM y los datos de GPS.




Las gráficas de estas diferencias se pueden observar en las Figuras 3-28 y 3-29, por lo cual se determinó excluir las estaciones con discrepancias de alturas mayores a 20 m (imágenes 3-28-a y 3-28-b), debido a que este valor influye en la precisión de un nuevo DEM, ya que sus incongruencias superan la resolución vertical tanto de los datos de la imagen DEM original como los datos directos tomados con GPS y por ende genera alta incertidumbre del verdadero valor en ese punto de localización de acuerdo estos dos tipos de fuentes, para ser utilizados en los estudios gravimétricos. Luego hay 16 estaciones con diferencias muy altas y no deben ser utilizadas en la generación de anomalías gravimétricas.

Al igual que diferencias mayores a 10 m. (imagen 3-28-c) correspondiente a 61 estaciones, que al dejarlas para la validación de estos datos generarían ambigüedades para el estudio gravimétrico, se decidió no incluirlas en el cálculo y la generación de anomalías de Bouguer, por lo que se descartaron aproximadamente un 16% de los datos correspondientes a 77 estaciones

Luego los datos aceptables para la generación de correcciones topográficas y la generación de anomalías gravimétricas corresponden a las estaciones que difieren y son menores a alturas de ± 10 m., en especial se tuvo en cuenta las estaciones con diferencias menores a 5 y 2 m., correspondientes a un 59% del total de los datos recolectados y procesados en forma directa, este análisis se puede observar en la imágenes 3-29-a. y 3-29-b, datos que se muestran en Tabla 3-12.

Tabla 3-12 Resumen de diferencia de alturas entre las dos fuentes para la validación de los datos

Δ Atura (m.)	Total Estaciones	%				
> ±30	11	2,355				
±20 - ±30	5	1,070				
±10 - ±20	61	13,062				
±5 - ±10	117	25,053				
0 - ±5	273	58,458		0 - ±1	62	22,628%
	467					

Después de evaluar los datos de la imagen DEM-SRTM de 30 m. de resolución (en donde se evidencio la zona deficiente y hay presencia de datos gravimétricos), y de comparar los datos de altura (entre los datos de la imagen del DEM y los datos de GPS tomados directamente), se procedió a realizar un mapa para validar los valores de altitud de la zona de estudio contenida en la imagen del DEM con los datos de campo, el cual se presenta en la Figura 3-30.

Se calcula con el nuevo mapa y por medio del modulo de corrección de terreno del programa especializado de *Geosoft*, la corrección topográfica para la aplicación y la generación del mapa de anomalías de Bouguer Total en la zona de estudio, para ser comparado con el mapa y las correcciones convencionales anteriormente realizado con los datos originales del DEM-SRTM de 30 m. de resolución.

El nuevo mapa de superficie (Figura 3-30) utilizado para la corrección de terreno y para las anomalías de Bouguer se realizo introduciéndole los datos de altura de las 451 datos correspondiente a las estaciones con menores discrepancias entre los datos del GPS y el DEM menores de 20m, realizando un remuestreo igual al del DEM original; generado de acuerdo al mejor mapa visual, según los procesos de modelamiento de superficie representado en la Figura 3-31 con el modelo de interpolación de Kriging de las imágenes 3-31-e y 3-31-f.

El comportamiento del modelo de interpolación se debe a que se aumento la cantidad de datos, los cuales tienen normalidad, y al software utilizado de Surfer que tiene los métodos de interpolación tales como: vecino más cercano (imagen 3-31-a), mínima curvatura (imagen 3-31-b), interpolación ponderada por el inverso a la distancia -IDW (imagen 3-31-c) y Kriging ordinario (imagen 3-31-d).

Figura 3-29 Localización de las estaciones tenidas en cuenta para la validación de los datos, entre $\pm 5\text{m}$ a $\pm 10\text{m}$ (a); y, entre 0m a $\pm 5\text{m}$ izquierda y entre 0m a $\pm 1\text{m}$ derecha(b)

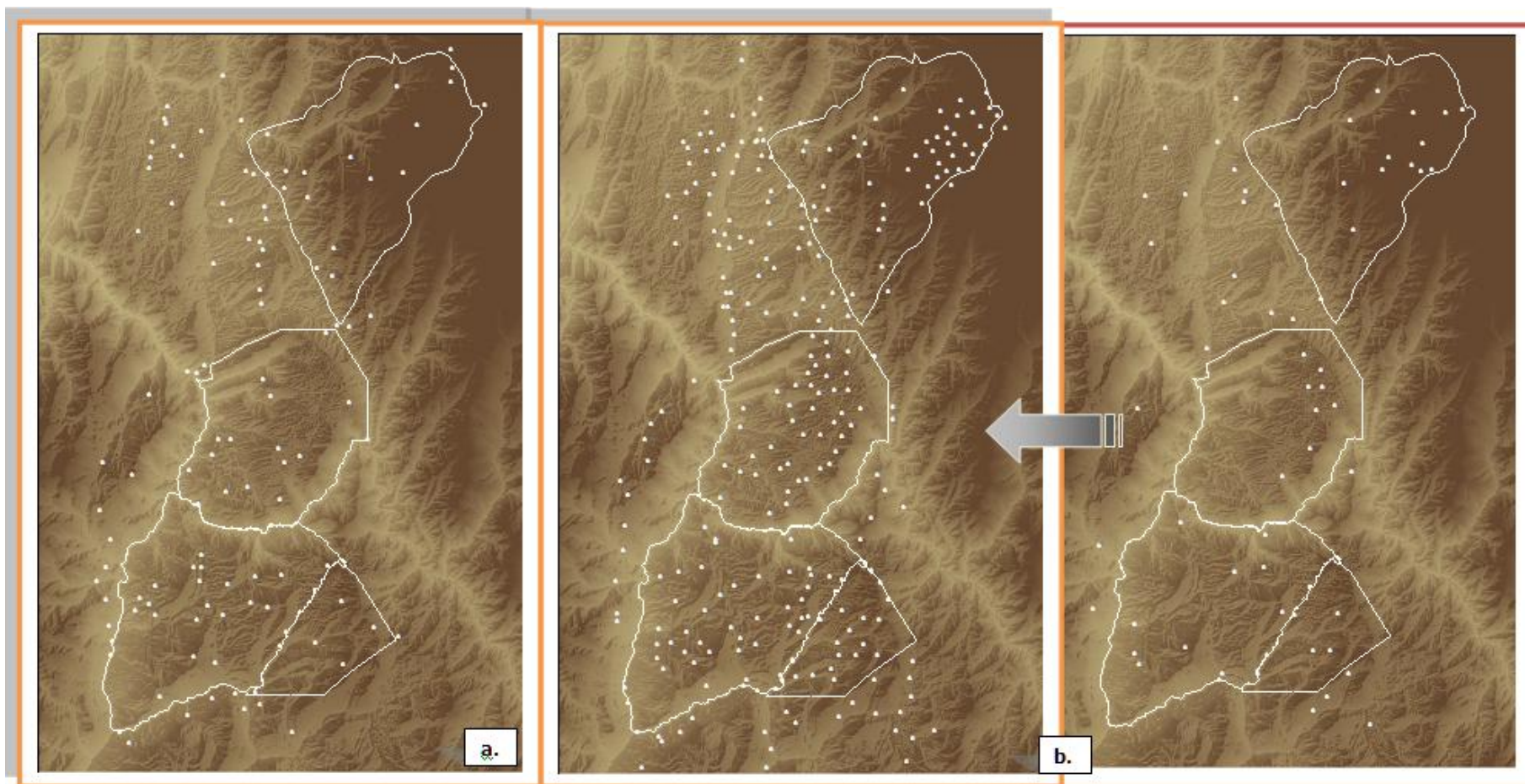
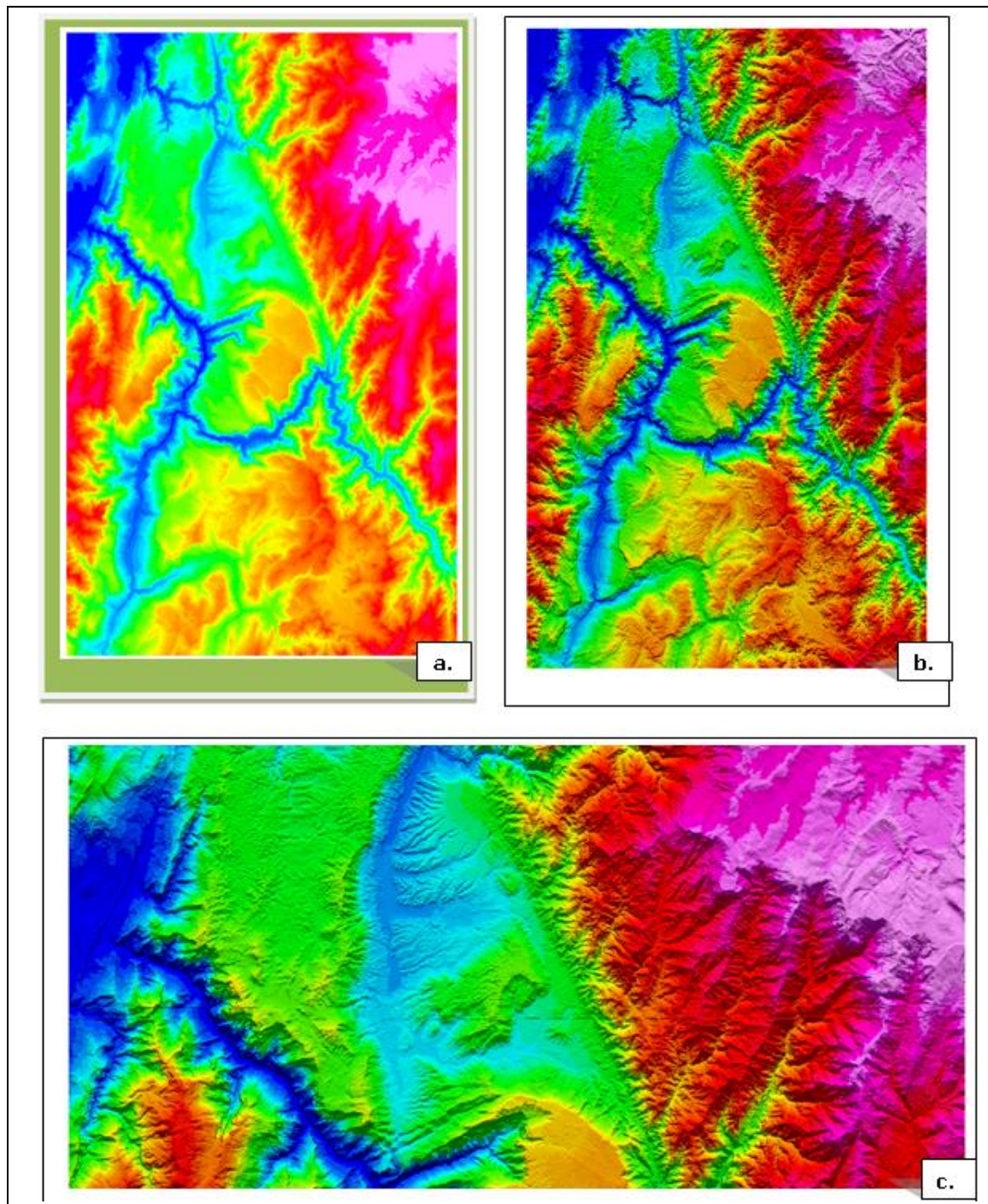
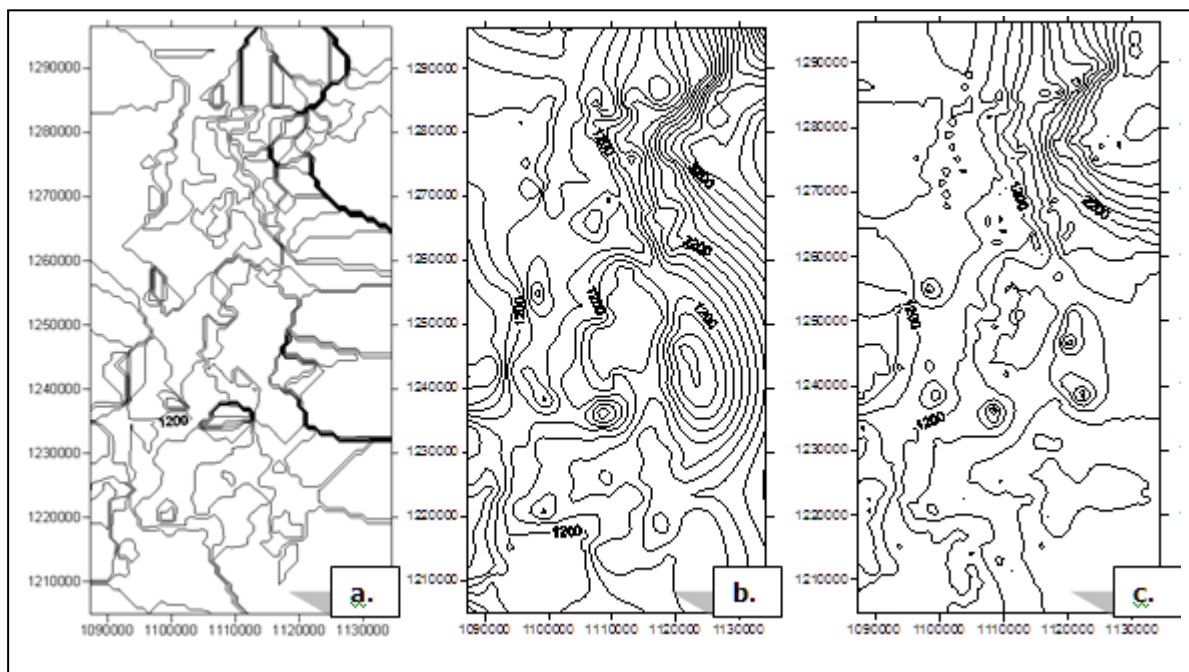


Figura3-30 Mapa de superficie corregido (a) y utilizado en la corrección de terreno o topográfica; imagen optima según $I=45-D=360-V=1$ - HE; y, zona de franja deficiente (c)



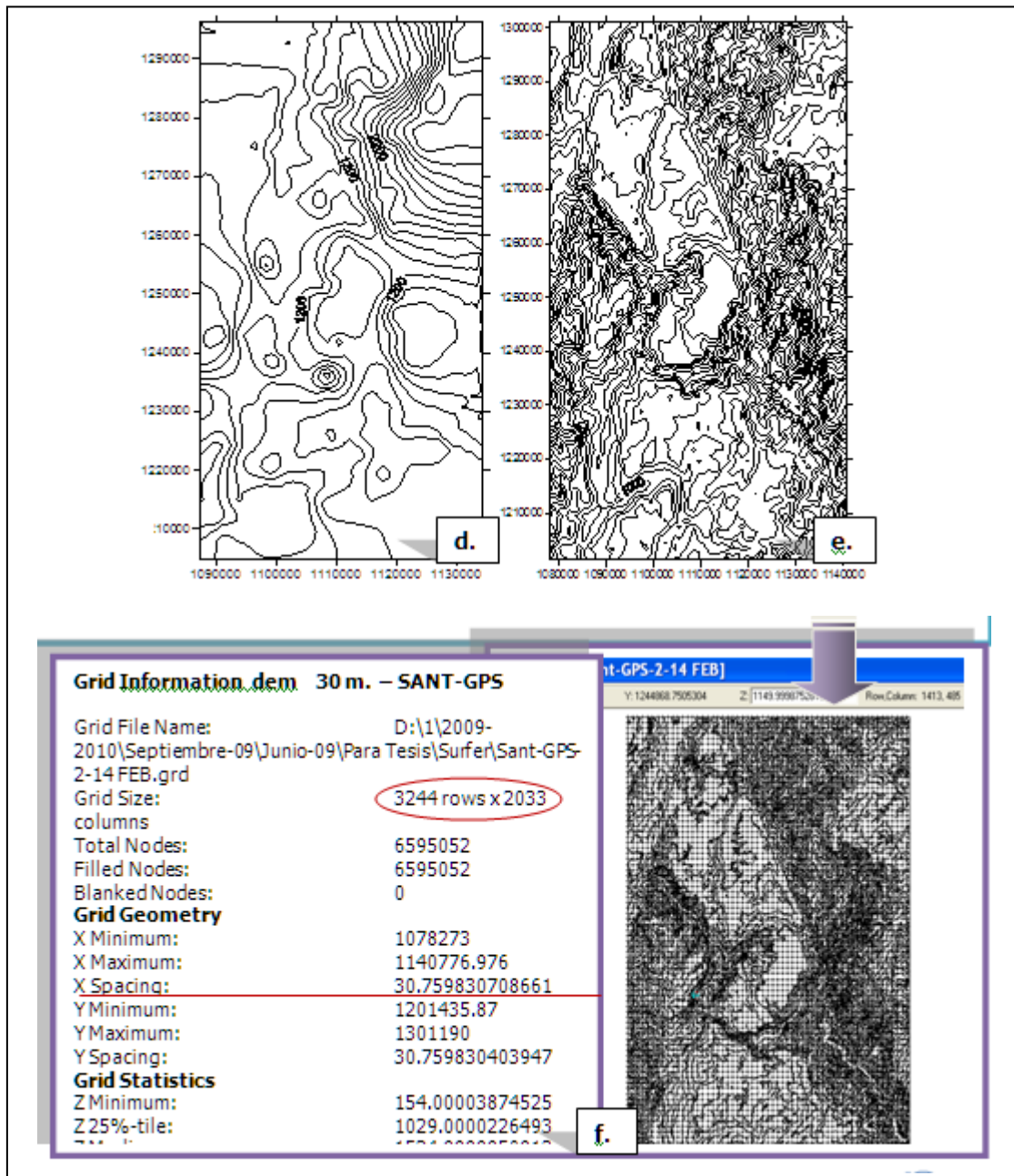
Para este nuevo mapa se tuvo en cuenta el valor de las 451 estaciones de datos con alturas del GPS (indicando que corresponde al 97% del total las estaciones) ya que el fin es corregir estos datos para generar un mapa con la misma región espacial igual a la del DEM-SRTM original, sin embargo por la poca información y densidad que se tiene en la zona de la franja deficiente no se logró su corrección, debido a que con los 451 datos, solo se incorporaron datos puntuales que hacen que la corrección topográfica realizada en los estudios de gravimetría tenga menos incertidumbre y genere una mejor aproximación de estas correcciones. En la franja deficiente solo se corrigieron los datos de altura de las estaciones GPS, por lo cual para su modelamiento y según la interpolación de los datos sigue teniendo problemas observados visualmente en la imagen 3-30-c, a causa de la insuficiencia de datos que proporcionen el arreglo total y un mejor modelado de superficie en esta región.

Figura 3-31 Procesos de modelamiento de superficie y mapa corregido utilizado para la corrección por terreno en el estudio gravimétrico de la zona en estudio



- a) Interpolación datos GPS vecino más cercano
- b) Interpolación datos GPS mínima curvatura
- c) Interpolación datos GPS idw
- d) Interpolación datos GPS Kriging
- e) Interpolación datos GPS y DEM Kriging sin remuestreo
- f) Interpolación datos GPS-DEM Kriging con remuestreo según DEM original

Continuación... Figura 3-31 Mapa corregido (f) utilizado para la corrección por terreno en el estudio gravimétrico de la zona en estudio



3.1.5 Corrección de terreno y Anomalías de Bouguer Total

Para los valores de altura del nuevo mapa topográfico generado (6'595.052 datos), como para los datos realmente tenidos en cuenta (390 datos) en la generación de la corrección de terreno y de las anomalías de Bouguer, se observa que los datos altimétricos se modelan bien según el interpolador de Kriging ordinario, de acuerdo a que sus datos y la

variable presentan una media estacionaria y se pueden transformar a una distribución normalizada.

El criterio de los 390 valores generadores de la anomalía gravimétrica se debió a:

- ✓ Que son los datos determinados hasta ± 10 metros de diferencia entre las fuentes trabajadas, de acuerdo a la resolución del DEM, que es de 30 m y a la toma de datos en terreno de aproximadamente 2 km de separación y su precisión milimétrica en elevaciones elipsoidales y ortométricas referidas al nivel medio del mar.
- ✓ Que a estos datos se les pueden llevar a una distribución normal con validaciones cruzadas y aplicación de BoxCox; y, que debido a que sus coeficientes de determinación (R^2) de las tendencias o regresiones son bajos (Tabla 3-13), se puede realizar el modelado mediante métodos de Kriging, ya que estos son menores a 0.2. Luego también mediante el test de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk realizada a los valores de anomalías de Bouguer Total (BT) se corrobora la hipótesis de que existe un 80% de normalidad de los datos.
- ✓ La significativa representación válida de los valores altimétricos, correspondientes al 83% del total de los datos GPS adquiridos.
- ✓ La distribución espacial cubriendo la mayor parte de las subzonas de estudio y la repartición de diferencias de altura, de acuerdo a la altimetría heterogénea y no acumulada en sectores montañosos o planos.

Tabla 3-13 Valores de tendencia para la variable de anomalías de Bouguer Total B_T y prueba Shapiro-Wilk

	R^2	BT & Este	BT & Norte
Tendencia			
1º. Lineal		0.026	0.171
2º. Logaritmica		0.026	0.170
3 º. Polinomial		0.099	0.173

Shapiro-Wilk normality test
data: Datos\$BT
W = 0.789, p-value < 2.2e-16

Se observa que los datos de la anomalía de Bouguer Total (BT) de las 390 estaciones tienen una media estacionaria, de acuerdo a la matriz de correlación espacial presentada en la Tabla 3-14.

Tabla 3-14 Matriz de correlación espacial respecto a la anomalía de Bouguer Total

	B_T	Este	Norte
B_T	1.0000000	-0.1640388	-0.4135349
Este	-0.1640388	1.0000000	0.2841178
Gravedad	-0.4135349	0.2841178	1.0000000

Esta matriz de correlación refleja una posible tendencia de la anomalía de Bouguer Total en dirección Sur, que no se tiene en cuenta dado que su magnitud no es importante.

Aunque a través de análisis exploratorios y descriptivos de los datos se observen valores atípicos en la anomalía de Bouguer Total estos se tuvieron en cuenta para la generación del correspondiente mapa. Para el modelamiento de la anomalía de Bouguer Total (B_T), al igual que para su comparación con los mapas presentados con metodología convencional, se utilizaron 3 tipos de Kriging: ordinario, simple y universal, con modelos de semivarianzas esférico, exponencial y gaussiano, visto en la Tabla 3-15.

Tabla 3-15 Resumen de parámetros de semivariogramas para Kriging de los datos de anomalías de Bouguer Total -BT

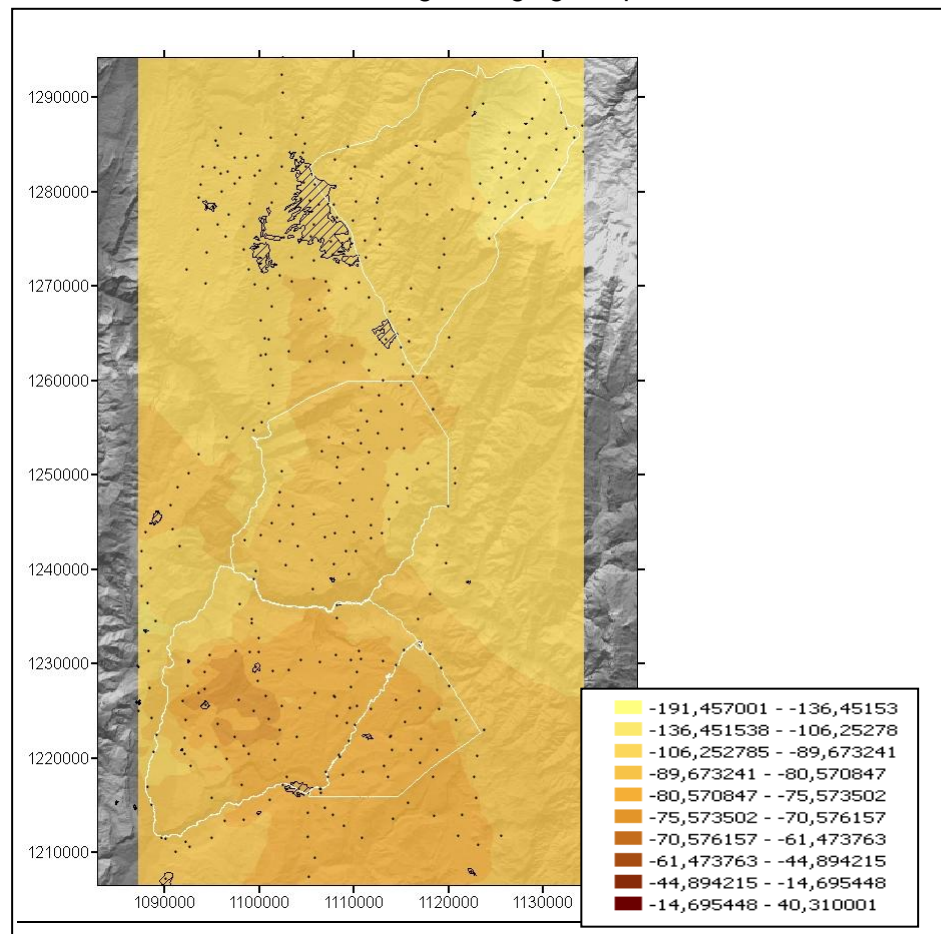
Kriging Anomalía BT	Ordinario			simple			Universal -Local		
Semivariogramas	Esférico	Exponenc.	Gaussiano	Esférico	Exponenc.	Gaussiano	Esférico	Exponenc.	Gaussiano
Rango (a)	65928,5	88489,4	53355,1	65867,9	88149,2	53355,9	84744,9	84744,9	84744,9
Meseta (C1)	320,09	395,19	273,33	320,07	394,91	273,37	0	0	0
Pepita (C0)	368,72	327,38	410,31	368,64	327,1	410,3	304,66	304,66	304,66
Mean	0,004054	0,02239	-0,03893	0,0549	0,07037	0,004196	0,05548	0,05548	0,05548
Root Mean Square	21,31	21,32	21,42	21,29	21,31	21,39	21,45	21,45	21,45
Average Standard Error	20,33	19,64	20,86	20,31	19,63	20,84	17,93	17,93	17,93
Mean Standardized	-0,00045	0,0002953	-0,002269	0,002039	0,002726	-0,0002341	0,002785	0,002785	0,002785
Root Mean Square Standardized	1,048	1,084	1,026	1,048	1,084	1,026	1,196	1,196	1,196

En la anterior tabla se observan los valores para cada uno de los semivariogramas, estos muestran que los parámetros de semivariogramas para los Kriging Ordinario y Simple son congruentes, pues en ningún caso hay un efecto pepita puro, como se observa en el

Kriging universal local. Los valores de los estadísticos de la validación cruzada fueron aceptables, pues en general la media del error para todos los modelos fueron cercanos a cero, al igual que el error de la media estandarizada, indicando en unos modelos que se están subestimando o sobrestimando los valores muestreados de la anomalía de Bouguer Total. El RMSS en todos los casos, sobrepasaron de 1, sin ser muy relevante, luego los mejores semivariogramas son los de los modelos gaussianos y esféricos.

Para realizar los mapas de variabilidad espacial de la anomalía de Bouguer Total se tuvo en cuenta los valores de los estadísticos de la validación cruzada y sin remoción de tendencia ya que por tener datos atípicos se modelo con el valor de la mediana para Kriging simple. Se modeló el mapa de variabilidad, con el modelo de Kriging simple, ajustado al semivariograma Esférico (Figura 3-32), el cual fue el mejor ajuste que presentó; la línea de tendencia de la validación fue para éste modelo aceptable sin sobrestimar datos considerables.

Figura 3-32 Mapa de Anomalías de BT modela según Kriging Simple Esférico



Determinado el mapa de Anomalía de Bouguer Total se realizó la comparación entre este nuevo y el anterior mapa generado sin criterios estadísticos rigurosos, con en el mapa altimétrico original del DEM-SRTM para la corrección de terreno que se debe tener en cuenta en el cálculo de las anomalías gravimétricas según Bouguer, por lo cual se observa que el modelamiento realizado para ambos fue de acuerdo a los métodos de interpolador lineal que corroboran y demuestran el mejor diseño en la generación de esta variable.

Las diferencias entre estos dos mapas, generados a partir de la metodología convencional (Figura 3-33 imagen a) y la metodología propuesta (Figura 3-33 imagen b) durante el desarrollo del presente proyecto de investigación, se observan en las 4 grandes zonas representativas y explicadas a continuación:

Zona A. En esta zona se conserva el comportamiento de modelamiento en ambos mapas aumentando un poco hacia la parte Norte las anomalías negativas, que es además límite de borde por lo que es ambigua su interpretación, sin embargo este aumento se debe al análisis de alturas y de estaciones tenidas en cuenta para la generación del nuevo mapa gravimétrico.

Zona B. Al igual que la zona anterior el comportamiento de modelamiento en ambos mapas se conserva, disminuyendo la magnitud de la anomalía negativa allí presente. Aunque es una zona no perteneciente a las subzonas hidrogeológicas estudiadas, se muestreo con mayor regularidad, observando un mejor diseño de toma de datos, pero que debido al comportamiento y de sus características geológicas no presenta mayor contraste geofísico, indicando que los parámetros de diseño de muestreo en estas variables deben ser tenidos en cuenta según los patrones geofísicos y geológicos y no geoespaciales.

Zona C. El comportamiento de modelamiento cambia en el nuevo mapa subestimándose y sobreestimándose las anomalías gravimétricas, creando zonas de contraste en sus anomalías debido a los criterios de las estaciones tenidas en cuenta para la generación del nuevo mapa gravimétrico, ya que en estas zonas habían datos con alturas mayores a ± 10 m. de diferencia, sin embargo este análisis es ambiguo debido a encontrarse en zona de borde.

Zona D. Al contrario que las anteriores zonas esta pertenece a la subzona de Guanentina del estudio hidrogeológico definido y realizado su muestreo para el estudio geofísico, más con base patrones con estaciones de gravedad y de altura, parámetros tenidos en cuenta para las generaciones de las anomalías de Bouguer. Esta zona tiene un gran cambio en donde se estaban sobreestimando las zonas altas de anomalías allí presentes.

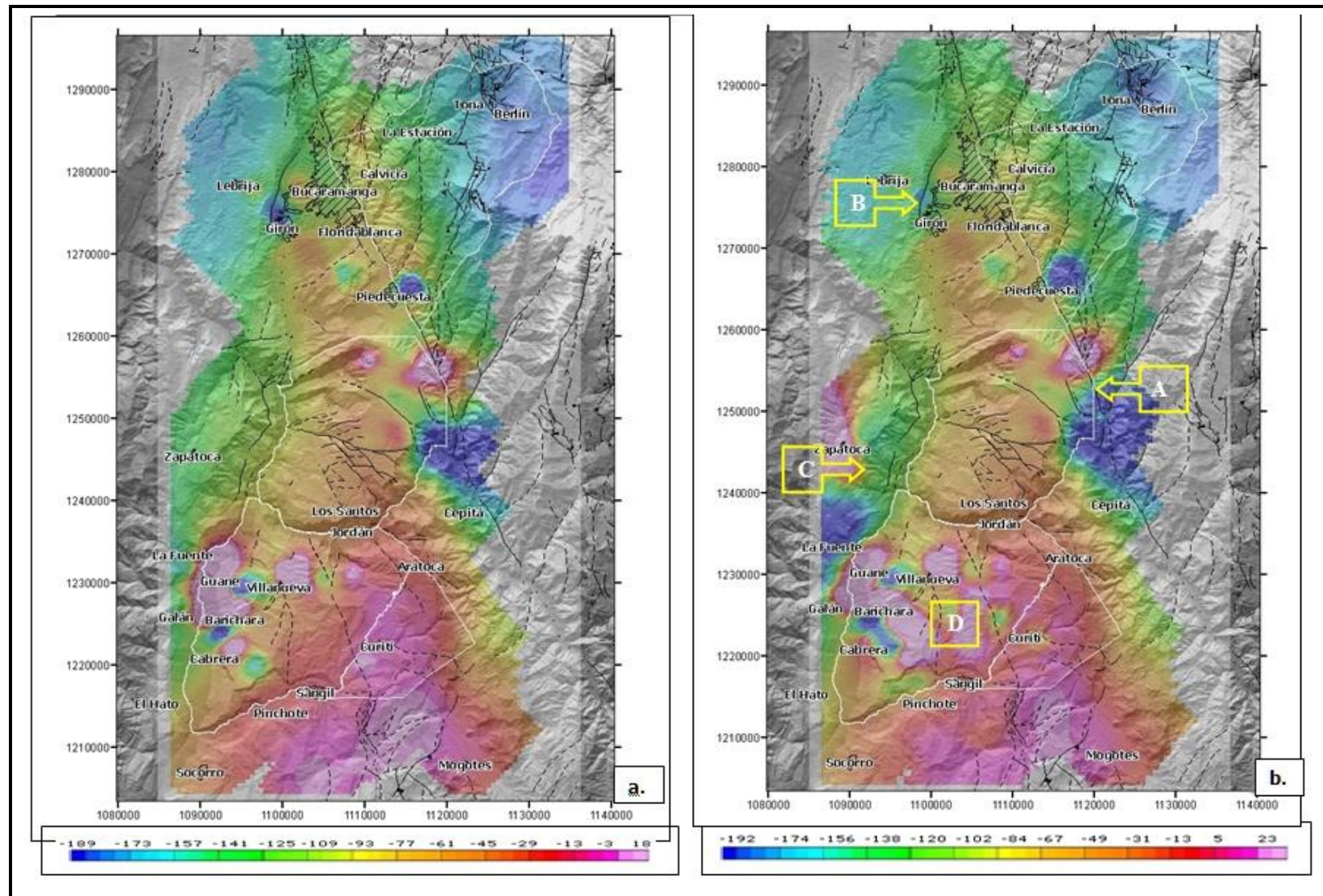
3.2 Discusiones

Para la validación de los datos adquiridos en campo de las variables altura y gravedad y dentro del contexto del cálculo de las anomalías gravimétricas y la corrección de terreno topográfica en la determinación del mejor modelo de superficie y asignación de interpolador de estas variables se considera que :

- Los datos de la variable altura tomados directamente por medio de GPS y para generar un mapa de superficie, se modela mejor con el método de Función de Base Radial FBR- que es un interpolador determinístico exacto, el cual proporcionó superficies de predicción que son comparables a la forma exacta de Kriging. Para esta variable y junto con los datos de gravedad la correlación en sentido E-W fue mayor al 72%, relacionada con la complejidad geológica que presenta esta zona de estudio, determinada por los grandes movimientos tectónicos y por fallas geológicas, en especial por la presencia de la Falla de Bucaramanga, encontrándose la mayor expresión topográfica hacia el sector oriental.
- Los datos de gravedad que fueron adquiridos en campo se modelaron de acuerdo a los resultados del mejor interpolador que fue el de la distancia inversa ponderada (IDW), interpolador determinístico, el cual no crea crestas ni valles, apropiado para estos valores de gravedad que son acumulaciones de los efectos de los materiales de la superficie terrestre con efectos de mayor profundidad. Este método asume que cada punto de entrada tiene una influencia local que disminuye con la distancia, representando así los valores de gravedad que se tienen para esta zona de estudio.
- Existe una alta correlación del 98% entre la dos variables de altura y gravedad siendo estas inversamente proporcionales, que a mayor altura menor gravedad y

viceversa, sin embargo tienen conductas que los diferencian como la tendencia y el modo de ajuste dando claridad a la manera de cómo se presentan en general las variables en esta zona de interés; como es la variación del comportamiento de la gravedad en los dos sentidos N-S y E-W, posiblemente siendo influenciando por las densidades de las rocas allí presentes, dando como resultados altos gravimétricos en la localización en superficie de rocas sedimentarias cretácicas, localizadas en la subzona hidrogeológica de Guanentina. A su vez los datos de altura tienden a variar espacialmente más hacia el sector de W-E, encontrándose las mayores alturas en sectores N-E nor-orientales, después de la Falla de Bucaramanga, con tipo de roca ígnea y porosa correspondiente a las unidades geológicas de la Cuarzomonzonita y al Gneiss de Bucaramanga allí expuestas. Esta correlación corrobora la influencia de las variables de altitud y gravedad en la generación de la anomalía y gradientes gravimétricos, las cuales se modelaron diferente a sus anomalías y con interpoladores menos exactos sin supuestos pero reflejando su comportamiento.

Figura 3-33 Comparación de mapas de anomalías de Bouguer Total B_T -Metodología convencional (a), Metodología propuesta (b)-



4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

La metodología propuesta radica en la combinación de datos y análisis de las fuentes de cada variable medida y creada según la geofísica aplicada a estudios de gravimetría, que con la ayuda de procesamientos digitales y análisis geoespaciales y estadísticos se pudo determinar las diferencias entre los mapas de Anomalías de Bouguer Total, realizados por metodologías anteriores y la propuesta en este proyecto; para estos resultados se utilizó el mismo interpolador Kriging, diferenciándose en el cambio de tipo de ordinario a simple, ya que existe una mejor relación con los supuestos de Kriging simple y debido a que los datos atípicos no se eliminaron y se pudo trabajar con su mediana; Además se estableció el cambio del modelo de semivarianza de Exponencial a Esférico, ayudando a la detección del comportamiento de las anomalías de Bouguer Total de acuerdo con las variables primarias de altura y gravedad para el entendimiento de cambios gravimétricos y su modelamiento en esta zona de interés, como fueron el establecimiento de la diferencia de cuatro (4) zonas con el cambio más representativo en la subzona de Guanentina donde se estaban sobreestimando las zonas altas de anomalías allí presentes.

Se evaluó la calidad de los datos ofrecidos por el Modelo de Elevación Digital (DEM) de la Nasa de 30 metros de resolución, pertenecientes a la zona de estudio. Para construir una imagen del relieve allí presente se realizaron pruebas según las características de la toma de estos en la misión topográfica de radar mundial -SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), concluyendo que para la mejor visualización del terreno en esta zona, las características deben ser realizadas con ángulos de incidencia bajos y preferiblemente de 23° , con un ángulo de declinación en la misma dirección de la toma de trayecto de la escena, sin necesidad de exageración vertical (ya que sus rasgos topográficos están bien definidos por la toma inmediata del par interferométrico) y con la ampliación del rango de variación de píxeles según la aplicación del histograma de

ecualización. De acuerdo con los análisis estadísticos no se encontro ninguna variación ni distorsión de los datos altimétricos en este DEM, por lo cual solo con el procesamiento digital se logró detectar una franja o zona deficiente de los datos reflejados en esta imagen, mediante la realización de procesos espaciales generando mapas de superficie, de contornos y de sombra. Franja que se encuentra en sentido Oriente-Occidente (cerca de la población de Piedecuesta) de 1,5. km ancho y donde se localizan (5) cinco estaciones gravimétricas medidas en terreno, las cuales fueron evaluadas para la corrección topográfica y la generación de la anomalía de Bouguer Total. Un Modelo Digital de Elevaciones -DEM es componente esencial de las estructuras de datos geoespaciales y el de 30 metros de resolución, dentro de la zona de interés presenta un 16% de inconformidad de acuerdo a la relación de sus alturas con respecto a las medidas con GPS, obteniendo 77 estaciones con diferencias mayores de ± 10 m.

La calidad de los datos de las imágenes de RadarSat-1 disponibles, se realizaron mediante los flujos de trabajo y los resultados de imágenes como parte del conocimiento y entendimiento de cómo son los datos de radar para realizar los procesos digitales debidos y correctos, que sirvieron como apoyo en la identificación de estructuras y lineamientos geológicos presentes en la parte Central del departamento de Santander-Colombia. Estas imágenes contenían una sola polarización HH por lo que fue posible visualizarlas únicamente en tonos grises. Para extraer valores de altura en estas imágenes, solo se logra con la relación de coeficientes de retrodispersión y archivos de tiempo de retorno de las ondas electromagnéticas, que no son dispuestos totalmente en este sensor y que debido a la combinación de la información fase y amplitud solo se pueden realizar procesos digitales de mejora de las imágenes.

Luego el criterio para la validación de los datos y la generación del nuevo mapa de superficie, la adecuada corrección topográfica y la generación de anomalías gravimétricas fue de establecer relaciones y análisis con datos de diferencias menores a ± 10 m., que corresponden al 84% de los datos validados en esta zona de acuerdo a las 467 estaciones geofísicas medidas. La corrección por efectos del terreno con la metodología propuesta proporcionó la validación de un mapa de superficie involucrando y corrigiendo el Modelo Digital de Elevación -DEM-SRTM- con datos GPS, el cual su comportamiento válido fue modelado por Kriging ordinario.

En el proceso de evaluación de las metodologías, la propuesta en este proyecto y la aplicación de procesos de Geomática fue importante ya que demostró la utilidad de los datos de imágenes de radar como insumo de bajo costo y alta calidad para estimar el relieve total de la zona central de Santander requerido para la generación de anomalías gravimétrica, alternativa que ayudo a la reconstrucción y validación del modelo de superficie o DEM, para la aplicación de las correcciones topográficas en esta región. Así mismo servirían en zonas con mapas desactualizados y en zonas con imprevistos o de difícil acceso para otros estudios geofísicos y en otras áreas de investigación que se requieran.

4.2 Recomendaciones

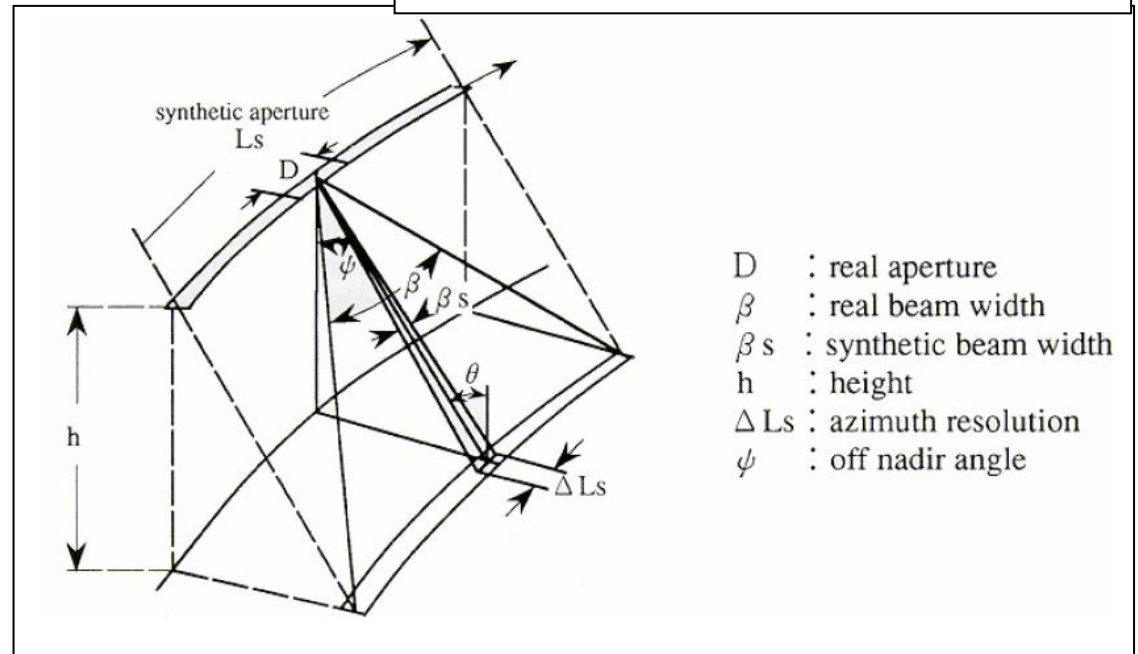
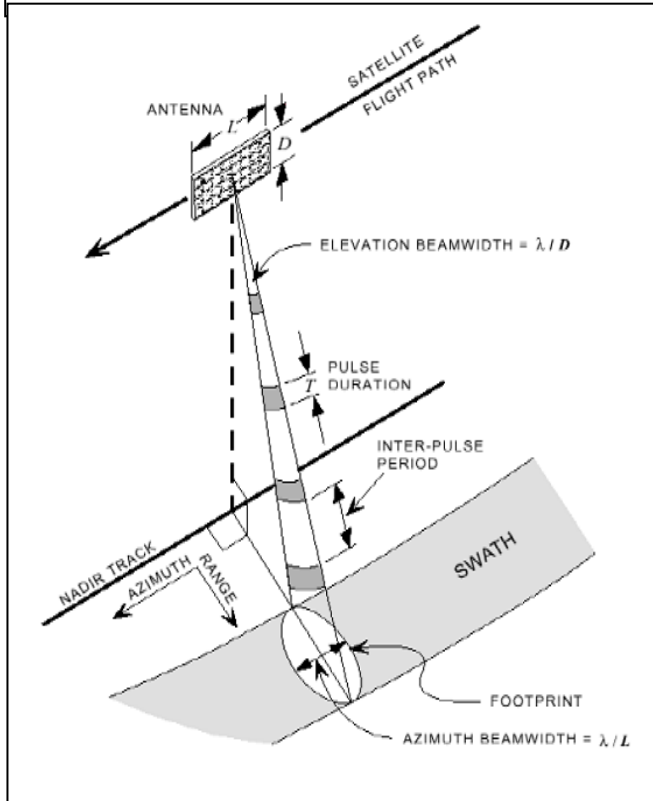
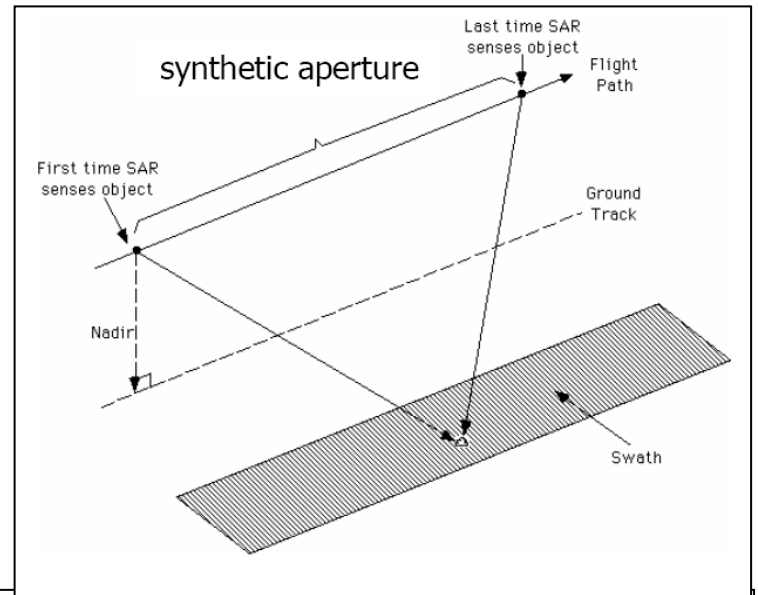
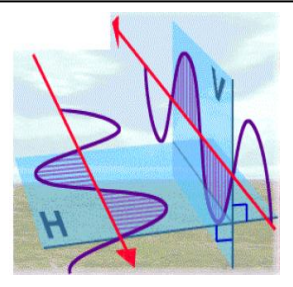
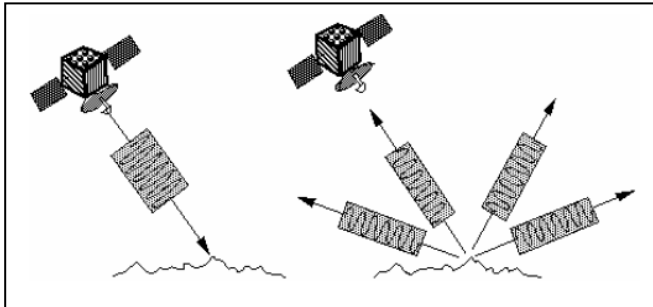
De acuerdo con la metodología propuesta para la corrección de terreno o topográfica en cada estación medida para los estudios gravimétricos, se dio a conocer las relaciones y procesos utilizados por medio de diferentes ciencias como la toma y adquisición de los datos por parte de la geofísica y la geodesia; el análisis de estos datos y su interpretación por medio de modelos estadísticos; y, de procesamiento digital para la extracción de datos altimétricos corregidos por medio de imágenes y/o productos radar como aplicación de la Geomática, por lo que se recomienda implementar esta metodología en todos los estudios geofísicos como geoeléctrica y sísmica donde se requiere un registro de buena calidad de los datos altimétricos para un buen modelamiento de las zonas estudiadas y que sirvan para la programación de rutas en adquisición de los datos.

Los únicos productos de radar disponibles en la zona de interés fueron de datos de imágenes de RadarSat-1 y el Modelo Digital de Elevación -DEM de 30 m. de resolución, por lo que se recomienda adquirir datos de imágenes radar de más sensores con niveles de procesamiento superiores o niveles básicos con todas las características y polarizaciones requeridas para realizar procesos de generación de modelos digitales del terreno y poder aplicar técnicas de Interferometría.

Los datos de las (3) tres imágenes de RadarSat-1 disponibles corresponden a pases orbitales y a modos de haz de toma diferentes por lo cual no lograron ser coherentes y no se pudo realizar técnicas de procesamiento digital interferométricas, que generen datos de altura. Los archivos de las imágenes, proporcionadas al principio en formatos imagen contenían datos de los niveles digitales que no determinaron relación alguna con valores altimétricos a estimar, por lo que en los productos de radar y dependiendo del programa especializado para su procesamiento digital se debe importar los datos desde los archivos originales -CEOS y aplicar el flujo de trabajo recomendado en este documento, ya que los únicos datos que se pueden comparar (mediante conceptos de potencia y tiempo de la señal reflejada por la transmisión de microondas hacia la superficie terrestre y su recepción de energía recogida por el sensor) con la altura del terreno son los obtenidos mediante la conversión de estos a datos en decibeles, sin embargo debido a que sus coeficientes de retrodispersión contienen información de altura también contienen información de propiedades dieléctricas de los componentes de esta superficie y es muy difícil separar y relacionar este contenido, si no se tienen archivos de tiempo de retorno de estas ondas electromagnéticas.

Anexo A: Principios del sistema radar de apertura sintética –SAR

Principios del sistema Radar de Apertura Sintética –SAR–



Anexo B: Distorsiones geométricas en una imagen Radar

Distorsiones geométricas en una imagen radar

Es virtualmente imposible representar un área sobre la superficie de la Tierra sin distorsión geométrica dentro de las imágenes de radar, los objetos altos parecen inclinarse hacia el sensor de radar. El sensor de radar mide el retardo entre transmisión y recepción para cada pulso del radar. Es por eso que se presenta a continuación las (3) tres principales distorsiones geométricas que se corrigen en una imagen RadarSat.

A) Fenómeno de Escorzo o Foreshortening

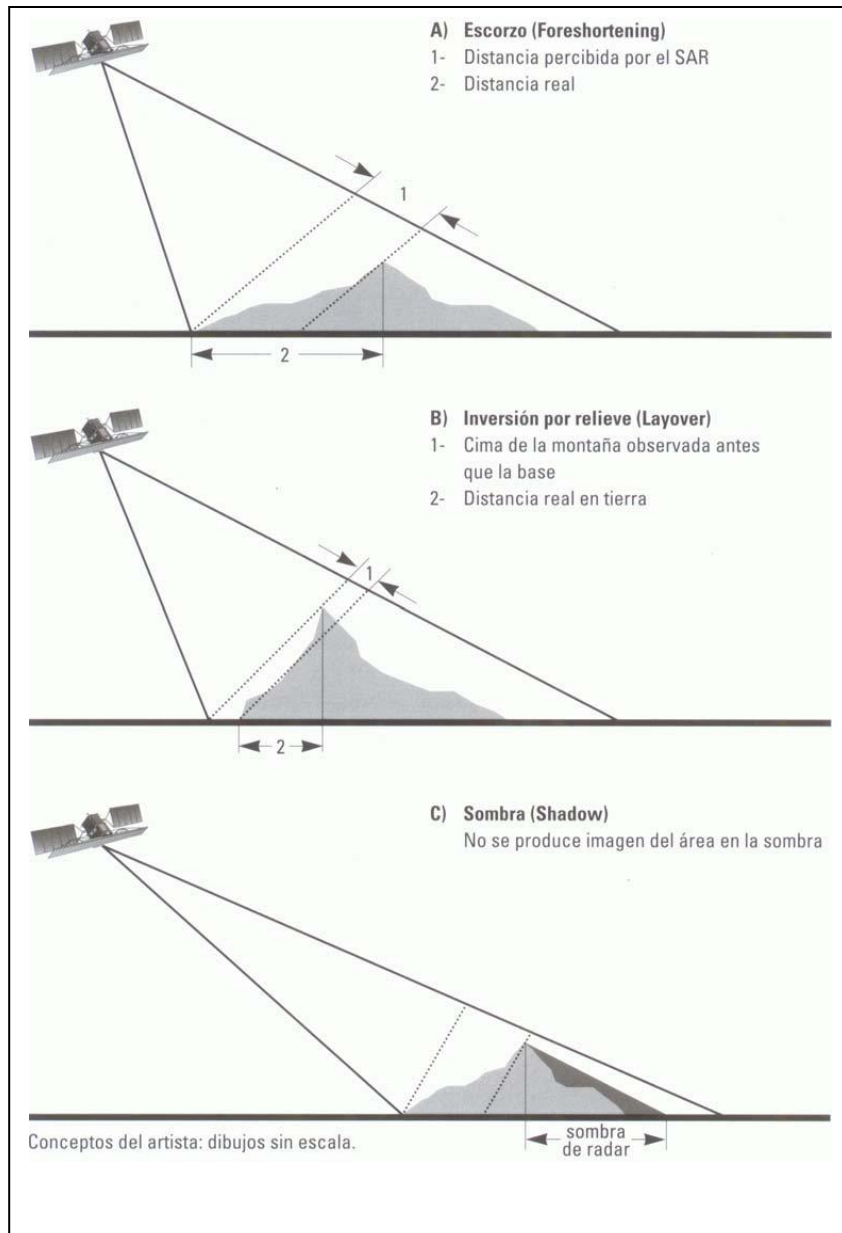
Desde que el pulso del radar generalmente refleja la cima de la montaña primero, la cima de la montaña se interpreta estar más cerca que la base de la montaña. Este fenómeno se llama escorzo.

B) Fenómeno de Inversión por Relieve o Layover

Cuando el escorzo se vuelve tan extremo que un objeto "se cae", resultando en la pérdida de un lado de la montaña, y se distorsiona el relieve viéndose contrario a la realidad.

C) Fenómeno de Sombra o Shadown

Las sombras también son una característica inherente de la mayoría de las imágenes de radar, y ocurren primariamente sobre los lados a sotavento de las montañas. El sombreado realza lineamentos, grietas y fallas, al resaltar cambios en la orientación del accidente.



Anexo C: Principales plataformas y sistemas de SAR espaciales existentes y sus características

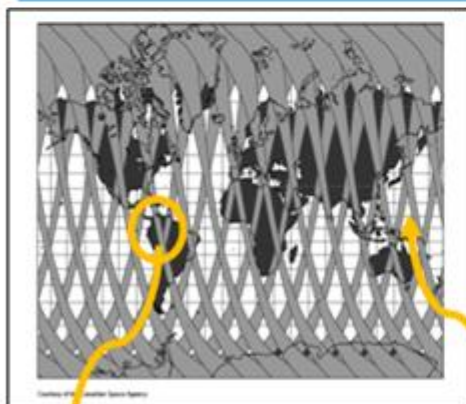
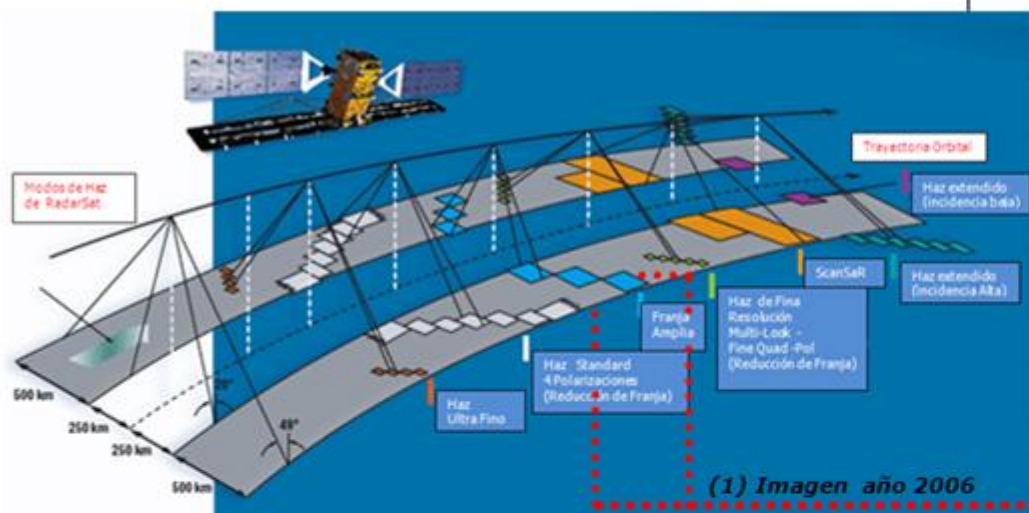
Principales plataformas y sistemas de SAR espaciales existentes y sus características

Satélite /Tipo de información	Seasat	SIR-A	SIR-B	Almaz	SIR-C /X SAR	ERS-1	JERS-1	ERS-2	RADARSAT 1 * ₁	Envisat 1 ASAR	ALOS PALSAR	SAOCOM	RADAR SAT 2	TERRASAR
País	E.U.	E.U.	E.U.	U.R.S.S	E.U.	Europa	Japón	Europa	Canadá	Europa	Japón	Argent.	Canadá	Alemania
Fecha de lanzamiento	Junio 1978	Noviem. 1981	Octubre 1984	Marzo 1991	Abril 1994	julio 1991	Febr. 1992	Abril 1995	Nov. 1995	2001	2002	2003	2003	Junio 2007
Tiempo de vida (diseño)	3 meses	2.5 días	8 días	2 años	cada 11 días	3 años	2 años	3 años	5 años	5 años	3-5 años	5 años	5 años	años
Banda	L	L	L	S	L, C, X	C	L	C	C	C	L	L	C	X
Longitud de onda (cm)	23.5	23.5	23.5	10	23.9, 5.7, 9.6	5.7	23.5	5.7	5.7	5.6	23.6	23	5.6	3.1
Polarización	HH	HH	HH	HH	L (VV) , C (VV) , X (4 Polarz)	VV	HH	VV	HH	Nota 1	Nota 2	Nota 3	Nota 4	VV, HH, HV
Ángulo de incidencia nominal (°)	23	50	15 - 64	30 - 60	15 - 50	23	38	23	10 - 59	15 - 45	8-60	15-40	10 - 60	10 - 60
Resolución nominal en la dirección del alcance (m)	25	40	25	15 - 30	10 - 26	26	18	26	10 - 100	30 - 1000	10-100	10-100	3 - 100	3 - 100
Resolución nominal en la dirección del azimut (m)	25	40	17 - 58	15	30	28	18	28	9 - 100	30 - 1000	10-100	10-100	3 - 100	3 - 100
Número de Observaciones	4	6	4	> 4	4	3	3	3	1 - 8	8	2-8	2-8	1 - 8	1 - 11
Ancho del área iluminada (km)	100	50	10 - 60	20 - 45	15 - 60	100	75	100	50 - 500	60 - 405	30-350	35-360	10 -500	10 -5 100 - 100
Repetición del ciclo (días)	17, 3	nula	nula	nula	nula	3, 35, 176	44	35	24	35	46	7	24	11

*₁ Sistema de SaR utilizado para el desarrollo del presente proyecto de investigación, de acuerdo a las imágenes Radar existentes en el país y disponibles en la zona de interés

Anexo D: Alcances de los Modos de haz de RadarSat, sus especificaciones y tipo de orbita

ALCANCES DE LOS MODOS DE HAZ DE RADARSAT, SUS ESPECIFICACIONES Y TIPO DE ORBITA



TIPOS DE TOMA ORBITAL

Fuente: <http://www.rsi.ca>

MODO DEL HAZ	POSICIÓN DEL HAZ	ANGULO DE INCIDENCIA (°)	RESOLUCIÓN APROXIMADA (m)	AREA NOMINAL(km)
Fina	F1 cerca	36.4 - 39.6	8	50 x 50
	F1			
	F1 lejos			
	F2 cerca			
	F2			
	F2 lejos			
	F3 cerca			
	F3			
	F3 lejos			
	F4 cerca			
Estándar	F4			
	F4 lejos			
	F5 cerca			
	F5			
	F5 lejos			
	S1	20 - 27		
	S2	24 - 31		
	S3	30 - 37	25	100 x 100
	S4	34 - 40		
	S5	36 - 42		
Ancho	S6	41 - 46		
	S7	45 - 49		
	W1	20 - 31		165 x 165
	W2	31 - 39	30	150 x 150
	W3	39 - 45		150 x 150
Extend. Alto	H1	49 - 52	25	75 x 75
	H2	50 - 53		
	H3	52 - 55		
	H4	54 - 57		
	H5	56 - 58		
	H6	57 - 59		
Extendido bajo	L1	10 - 23	35	170 x 170
	L2	24 - 31		
ScanSAR angosto	SN1	20 - 40	50	300 x 300
	SN2	31 - 46		
ScanSAR ancho	SW1	20 - 49	100	500 x 500

**Anexo E: Características de productos
Satelitales comparados con algunos
productos Radar**

CARACTERÍSTICAS DE LOS PRODUCTOS SATELITALES COMPARADOS CON ALGUNOS PRODUCTOS RADAR

Según los datos de la señal original los productos para formar una imagen Radar son:

Productos Georeferenciados

Son complejos y detectados en función del alcance proyectado en el terreno; su ubicación geográfica relativa es incorporada a la imagen; no están corregidos para representarlos en una proyección cartográfica; y, no deben ser utilizados con propósitos cartográficos.

En las Imágenes Productos Georeferenciados se tiene que:

- ✓ Las líneas y los píxeles están orientados con respecto al sistema del radar (en el caso de RADARSAT los productos son de Resoluciones SGF, SGX)
 - la dirección de la línea es la dirección del azimut del radar.
 - la dirección de los píxeles es la dirección del alcance del Radar
- ✓ La ubicación geográfica de los píxeles es aproximada y se basa en el nivel medio del mar (n.m.s.m) de una Tierra elíptica localmente esférica.
 - Normalmente se almacena en el encabezado del producto.
 - Normalmente se basa sólo en modelos de la órbita, no utiliza puntos de control geocodificados.
 - Se conoce como Georeferenciado sistemáticamente.
- ✓ Puede representarse en función del alcance o del alcance proyectado en el terreno, con diversas posibilidades para el espaciamento entre píxeles.
 - Terminología diferentes para cada satélite (Tabla A)

Tabla A. Comparación entre los Productos de diferentes satélites

RADARSAT	ERS - Europa	ERS - Norteamérica	SPOT	Landsat
Path Image (SGF)	Imagen de Precisión Georeferenciada (PRI)	Resolución Fina Georeferenciada (SGF)	1B	Orientado hacia trayectoria la Corrección sistemática y/o de Precisión
Path Image Plus (SGX)	N/A	N/A	N/A	N/A
Map Image (SSG)	Imagen Geocodificada (GEC)	Sistemáticamente Geocodificado (SSG)	2A	Orientado a la. Cartografía Corrección sistemática
Precision Map Image (SPG)	Imagen Geocodificada del Terreno (GTC)	Precisión Geocodificada (SPG)	2B	Orientado a la cartografía Corrección de Precisión
Precision Map Image (SPG)	en bruto ¹	en bruto ¹		en bruto ²
Precision Map Image (SPG)	Complejo de observación única (SLC)	Complejo de observación única (SLC)	N/A	N/A

1 Los datos de la señal SAR no pueden ser visualizados como imagen

2 Datos ópticos originales (SPOT, Landsat) pueden ser visualizados como imagen.

Fuente: RADARSAT International, 1995, *RADARSAT Illuminated- Your Guide to Products and Services*

CONTINUACION... CARACTERÍSTICAS DE LOS PRODUCTOS SATELITALES COMPARADOS CON ALGUNOS PRODUCTOS RADAR

Productos Geocodificados

Son detectados y tienen un alcance proyectado en el terreno; son corregidos geoméricamente para conformarlos a una proyección cartográfica; frecuentemente utilizan puntos de control terrestre y DEM para mejorar la exactitud de la geocodificación; comúnmente se reajustan para que el píxel sea un cuadrado estándar. La Tabla B contiene un compendio de los productos de RADARSAT.

En las Imágenes Productos de los Geocodificados, en RADARSAT, se tiene que:

- ✓ Los SSG, Sistemáticamente Geocodificado o *Map Image*:
 - Se procesa de forma que el "norte quede hacia arriba" y se corrige para poder representarse en una proyección cartográfica.
 - La imagen puede convertirse a una de muchas proyecciones cartográficas.
 - El muestreo espacial se mantiene como en los datos originales.
- ✓ Los SPG, de Precisión Geocodificada o *Precision Map Image*
 - Se continúa el procesamiento de la información para corregir los datos por ubicación geográfica, mediante la utilización de un Modelo Digital de Elevación del Terreno y de numerosos y puntos terrestres de control preciso ubicados dentro del área de la imagen.
 - El formato de los datos y las proyecciones cartográficas son iguales que las de SSG.
 - El muestreo espacial se mantiene como en los datos originales.

Tabla B. Características de los productos de una imagen de RADARSAT

Nombre del producto	Nombre de RSI*	Formato	Modo	Distanciamiento de píxel (m) aproximado	# Observaciones	Características Generales
Valores Complejos de Observación Única (SLC)	Valores Complejo de Observación Única	Alcance	Estándar Fino Ancho Extendido Alto Extendido Bajo	11.6 x 5.1 4.6 x 5.1 11.6 x 5.1 11.6 x 5.1 8.1 x 5.1	1 x 1 1 x 1 1 x 1 1 x 1 1 x 1	Cada píxel es representado por valores complejos I y Q Debe ser procesado para generar una imagen Mantiene óptima resolución
Resolución Fina de Georeferencia (SGF)	Path Image	Alcance proyectado en el terreno	Estándar Fino Ancho Extendido Alto Extendido Bajo ScanSAR Angosto ScanSAR Ancho	12.5 x 12.5 6.25 x 6.25 12.5 x 12.5 12.5 x 12.5 12.5 x 12.5 25 x 25 50 x 50	1 x 4 1 x 1 1 x 4 1 x 4 1 x 4 2 x 2 2 x 4	Orientado en el trayecto de la órbita Debe ser corregido geoméricamente si se requiere para cartografía
Resolución Extra-Fina de Georeferencia (SGX)	Path Image Plus	Alcance proyectado en el terreno	Estándar Fino Ancho Extendido Alto Extendido Bajo	8 x 8 3.125 x 3.125 10 x 10 8 x 8 10 x 10	1 x 4 1 x 1 1 x 4 1 x 4 1 x 4	Menor distanciamiento del muestreo que en SGF. Mantiene la totalidad de la resolución del haz
Sistemáticamente Geocodificado (SSG)	Map Image	Alcance proyectado en el terreno	Estándar Fino Ancho Extendido Alto Extendido Bajo	12.5 x 12.5 6.25 x 6.25 12.5 x 12.5 12.5 x 12.5 12.5 x 12.5	1 x 4 1 x 1 1 x 4 1 x 4 1 x 4	El producto SGF es procesado con el Norte hacia arriba y corregido a una proyección cartográfica
Precisión Geocodificada (SPG)	Precisión Map Image	Alcance proyectado en el terreno	Mismo que Map Image	Mismo que Map Image	Mismo que Map Image	El producto SGF es corregido utilizando GCPs y un DEM. El mejor producto posicional

*Una empresa privada, RADARSAT International, Inc. (RSI), se estableció en 1989 para procesar, comercializar y distribuir datos de RADARSAT para los usuarios canadienses e internacionales. RSI Radar Sensitivity Improvement. Los datos en rojo corresponden a las características de las imagen de RadarSat-1 utilizada en la aplicación de la metodología

Fuente: <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/>

Anexo F: Características de Geoposicionamiento en un sensor Radar

CARACTERISTICAS DE GEOPOSICIONAMIENTO EN UN SENSOR RADAR

Modelo de la Imagen SAR

Este describe cómo obtener a partir de un pixel en una imagen SAR (especificado por una línea de rango y un pixel de rango) una posición sobre la superficie terrestre [especificada en el sistema de coordenadas centradas de la tierra (ECS) o en coordenadas x, y, z]. Este proceso es usado durante el ajuste de efemérides y durante la ortorectificación.

Para cada línea de rango y pixel de rango en la imagen SAR, se determina la localización (posición) destino correspondiente (R_t). La localización objetivo puede ser descrita como (lat, lon, elev) o como (x, y, z) en ECS. El objetivo puede estar sobre un elipsoide terrestre o sobre un elipsoide terrestre más un modelo de elevación.

En cualquier caso, la localización de R_t está determinada por la intersección del cono Doppler, la esfera de rango y el modelo de la tierra. Con el objeto de hacer esto, primero se debe encontrar el centroide Doppler y el rango slant para un pixel de la imagen SAR dado por:

$$i = \text{pixel de rango y } j = \text{línea de rango.}$$

Tiempo

Tiempo $T(i)$ es: $T(i) = T(0) + ((j-1)/(Na-1)) * t_{dur}$

Donde $T(0)$ es el tiempo de inicio de la imagen
 Na es el número de rango de líneas
 t_{dur} es el tiempo de duración de la imagen.

Centroide Doppler

El cómputo del centroide Doppler f_d para usar con el modelo de imagen SAR depende de cómo fue procesado el dato. Si al dato se le removió la inclinación, el valor es siempre 0. Si el dato está inclinado, entonces este valor puede ser una constante diferente a cero o podría variar con i .

Rango de Inclinación (Slant)

El cálculo del rango de inclinación del pixel i depende de la proyección de la imagen. Si el dato está en la proyección del rango de inclinación de proyección, entonces el cálculo del rango de inclinación es sencillo:

$$Rsl(i) = rsl + (i-1) * \Delta rsl$$

Donde $Rsl(i)$ es el rango de inclinación al pixel i
 rsl es el rango de inclinación cercano
 Δrsl es el espaciamiento del pixel del rango de inclinación.

Si la proyección es una proyección del rango del terreno, entonces este cálculo es potencialmente más complicado y depende de cómo el dato fue originalmente proyectado en la proyección del rango del terreno por el procesador SAR.

Sistema de Coordenadas de Efemérides

Las posiciones y velocidades de los vehículos espaciales se asumen internamente que están en un sistema de coordenadas fijas respecto a la tierra. Si las efemérides son suministradas en un sistema de coordenadas inercial, OrthoRadar de los programas especializados las convierte a coordenadas fijas respecto a la tierra. El sistema de coordenadas fijas respecto a la tierra es un sistema de coordenadas cartesianas geocéntricas que giran con la tierra.

Modelamiento de Efemérides

La efemérides de la plataforma está descrita por tres o más posiciones y velocidades. Para predecir la posición y la velocidad de la plataforma en un tiempo (t).

$$\begin{aligned} R_{s,x} &= a_1 + a_2 t + a_3 t^2 \\ R_{s,y} &= b_1 + b_2 t + b_3 t^2 \\ R_{s,z} &= c_1 + c_2 t + c_3 t^2 \\ V_{s,x} &= d_1 + d_2 t + d_3 t^2 \\ V_{s,y} &= e_1 + e_2 t + e_3 t^2 \\ V_{s,z} &= f_1 + f_2 t + f_3 t^2 \end{aligned}$$

Donde R_s es la posición del sensor y V_s es la velocidad del sensor:

$$\begin{aligned} R_s &= [R_{s,x} \ R_{s,y} \ R_{s,z}]^T \\ V_s &= [V_{s,x} \ V_{s,y} \ V_{s,z}]^T \end{aligned}$$

Para determinar los coeficientes del modelo $\{a_i, b_i, c_i\}$ y $\{d_i, e_i, f_i\}$, primero se realiza el preprocesamiento, y los mejores tres datos de puntos consecutivos para la prueba deben cubrir la imagen completa en el tiempo. Si más de un conjunto de tres datos cubre la imagen, se deja el grupo de tres que tiene el tiempo central más cercano al tiempo del centro de la imagen.

Luego que se ha encontrado un grupo de tres puntos de datos consecutivos, se modela la efemérides con una solución exacta. Formando la matriz A :

$$A = \begin{bmatrix} 1.0 & t_1 & t_1^2 \\ 1.0 & t_2 & t_2^2 \\ 1.0 & t_3 & t_3^2 \end{bmatrix}$$

Donde t_1, t_2 , y t_3 son los tiempos asociados con cada posición de la plataforma. Se selecciona t donde $t = 0.0$ que corresponde al tiempo del segundo punto de posición. Se forme el vector b :

$$b = [R_{s,x}(1) \ R_{s,x}(2) \ R_{s,x}(3)]^T$$

Donde $R_{s,x}(i)$ es la coordenada x de la posición i de la plataforma ($i=1:3$). Y se resuelve $Ax=b$ donde x es:

$$x = [a_1 \ a_2 \ a_3]^T$$

Para hacer esto, se utiliza la descomposición LU. Luego el proceso se repite para $R_{s,y}$, $R_{s,z}$, $V_{s,x}$, $V_{s,y}$, y $V_{s,z}$.

Continuación... CARACTERISTICAS DE GEOPOSICIONAMIENTO EN UN SENSOR RADAR

Las técnicas de interpolación de datos de efemérides son las de LaGrange, que garantizan la ubicación de los puntos de muestreo que puede producir mejores resultados para una imagen que tiene decenas de miles de líneas de exploración. Sin embargo, esto es costoso y se necesitan de la captura de todos los datos en las tres dimensiones. Mediante el uso de la siguiente ecuación, el método de interpolación polinómica es mucho más rápido y es adecuado para la mayoría de imágenes de satélite:

$$p = \sum_{k=1}^N \left(\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^N \frac{t - t_i}{t_k - t_i} \right) \cdot p_k$$

Dónde

p es la efemérides de datos, tales como coordinar X de posición del satélite en el tiempo t

N es el número de puntos utilizados

t es el tiempo

Cualquier imagen con un registro de calibración geométrica es calibrada. El modelo geométrico que contiene la información se refiere al sistema de coordenadas de la Tierra (es decir, información de la proyección), entonces la imagen es georreferenciada. El siguiente diagrama de flujo ilustra los pasos de georeferenciación:



El proceso de ortorectificación consiste de varios pasos:

- Modelamiento y refinamiento de efemérides (si se suministran GCPs)
- Generación de una grilla (cuadrícula) cartográfica amplia
- Formación de la salida (incluyendo correcciones de terreno)

Para poder procesar la parte correcta del espectro de frecuencias de azimuth, el algoritmo de gama-Doppler requiere como entrada el centroide Doppler. También se requiere el conocimiento de la transmisión de impulsos para la compresión de rango, y de la geometría de la imagen, tales como el alcance y la velocidad del satélite para la construcción del azimuth filtro adaptado. Los principales pasos se muestran en el siguiente diagrama:

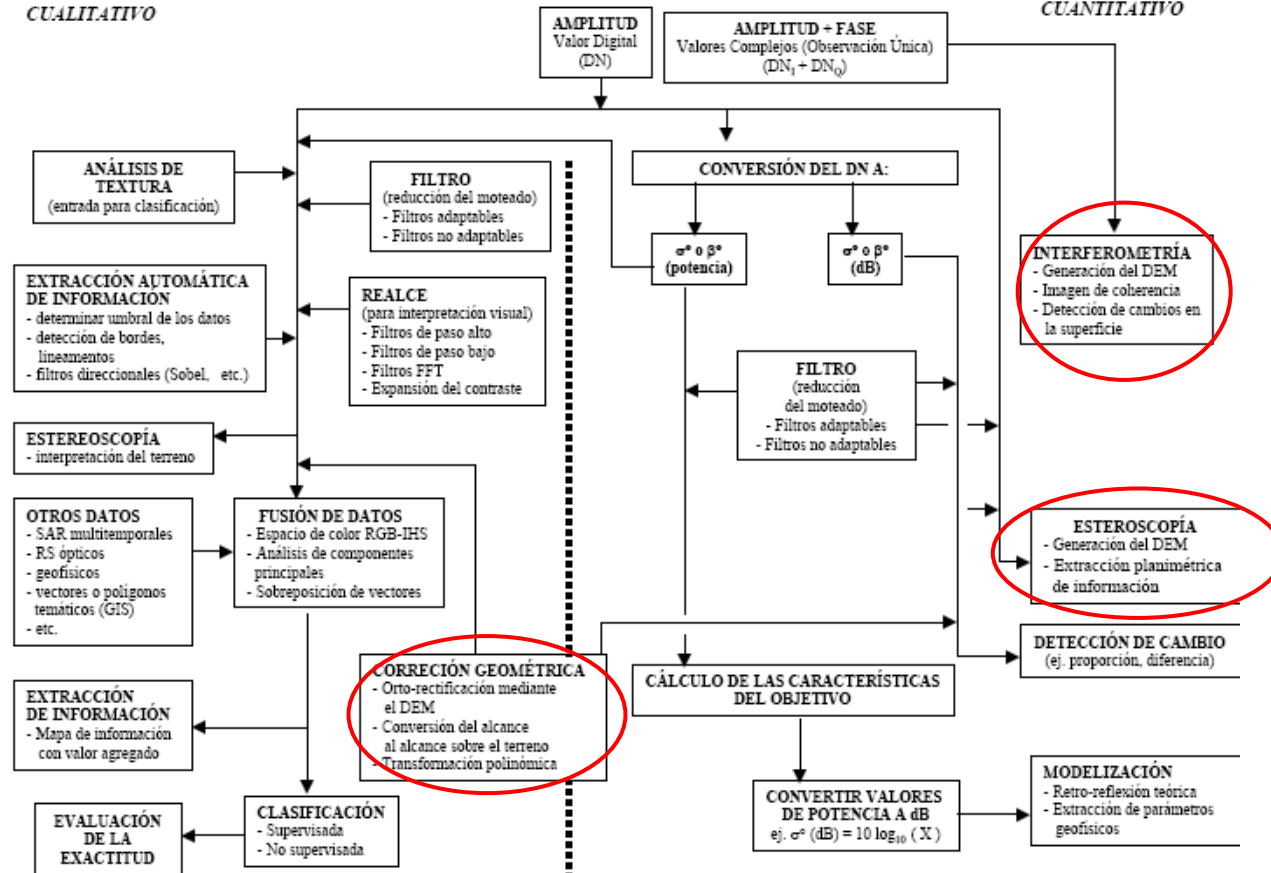


**Anexo G: Metodología “típica” del
procesamiento de imágenes SAR y
técnicas de Interferometría – creación
DEM-SRTM**

METODOLOGÍA "TÍPICA" DEL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SAR Y TÉCNICAS DE INTERFEROMETRÍA

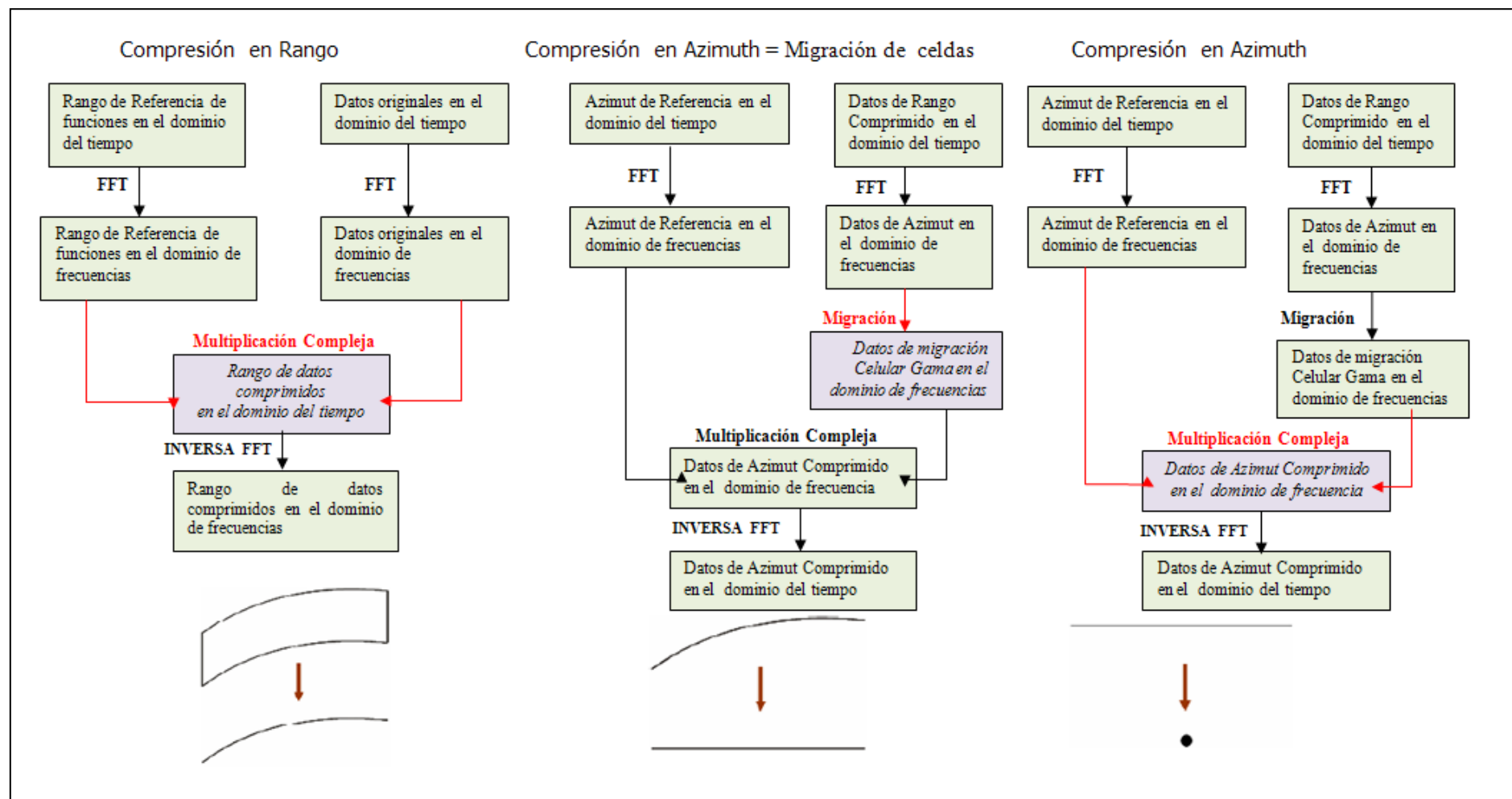
CUALITATIVO

CUANTITATIVO



Anexo H: Esquema de trabajo de los algoritmos Gamma-Doppler y Omega-K en sistemas SAR

ESQUEMA DE TRABAJO DE LOS ALGORITMOS GAMA DOPPLER Y OMEGA-K -SAR TRAINING PROCESSOR (Gens, R. et al 1996) [9]



Bibliografía

- [1] Bamler, R. and Just, D. September. (1993) "Phase statistics and decorrelation in SAR interferograms", Proc. Of the ESA CEOS'93 workshop, Noordwijk.
- [2] Bustos O. H. et al (2002). Filtros interactivos reductores de ruido speckle en imágenes. Revista de Teledetección. 2002. 17: 61-70.
- [3] Danielson, J. and Gesch, D (2008). An Enhanced Global Elevation Model Generalized From Multiple Higher Resolution Source Datasets. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences. Vol XXXVII, Part B4, Beijing 2008, p 1857-1863.
- [4] Durand, J. M., et al (1987). SAR data filtering for classification. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 25, 629–637.
- [5] Esquivel, H., et al (1998). Mapa Gravimétrico de Colombia Convenio: IGAC - INGEOMINAS MANUAL DE GRAVIMETRIA. 1998. Líneas de nivelación de la Red Gravimétrica Nacional. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá.
- [6] Farr, T. G., et al. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission, Rev. Geophys., 45, RG2004, doi:10.1029/2005RG000183. p 21- 22.
- [7] Franceschetti, G and Lanari, R. (1999). Synthetic aperture radar processing. Electronic engineering systems series. CRC Press. pp. 145
- [8] Funk, A. K. et al (1986a) Microwave Remote Sensing: Active and Passive III: From Theory to Applications (Norwood: Artech House).
- [9] Gens, R. et al (1996). SAR interferometry - Issues, techniques, applications, International Journal of Remote Sensing, 17, 1803-1835.
- [10] Gesch, D.B. et al (1999), New land surface digital elevation model covers the earth: Eos, Transactions, American Geophysical Union, v. 80, no. 6, p. 69-70.
- [11] Goodman, J.W. (1975). Statistical Properties of Laser Speckle Patterns. In Laser Speckle and Related Phenomena, Dainty, J. C., Hrsg., Springer Verlag, 9.75.
- [12] Grohman et al (2006): Filling SRTM Voids: The Delta Surface Fill Method: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, v. 72, no. 3, p 213 - 217.

- [13] Groten y Müller, 1990 Groten E. y Müller T. (1990). Combined sea surface determination based on Various Geometric and Dynamic Techniques, Marine Geodesy 14, 185-195
- [14] Gruen, A., and Wolff, K (2007), DSM Generation with ALOS/PRISM Data Using SAT-PP, Instituted of Geodesy and Photogrammetry ETH Zurich, Zurich , Switzerland.
- [15] Guth, P.L. (2006) Geomorphometry from SRTM: Comparison to NED: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 72, no. 3, p 269 - 277.
- [16] Hammer, S. (1939), Terrain corrections for gravity meter stations: Geophysics; Hammer, S. (1945). Estimating ore masses in gravity. prospecting. Geophysics; Hammer, S. (1963). Critique of terrain corrections for gravity stations. Geophys.
- [17] Hofton, M. et al (2006), Validation of SRTM Elevation Over Vegetated and Non-vegetated Terrion Using Medium Footprint Lidar: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 72, no. 3, p 279 - 285.
- [18] Jarvis, A. et al. (2004). Practical use of SRBM data in the tropics - Comparisons with digital elevation models generated from cartographic data. Working Document no. 198, 32 pp. CIAT, Cali, Colombia.
- [19] Kane, M.F., (1962). A Comprehensive System of Terrain Corrections Using a Digital Computer. Geophysics, v 27, no 4, pp. 455–462.
- [20] Kanevsky , M.B. (2008). Radar imaging of the ocean waves. Elsevier. pp. 138.
- [21] Kearey, P. et al. (1991). An introduction to Geophysical exploration. 2da. Edition. Blackwell scientific publications, Oxfor.
- [22] KelIndorfer, J. et al (2004). Vegetation height estimation from Shuttle Radar Topography Mission and National Elevation Datasets: Remote Sensing of Environment, v. 93, p. 339 - 358.
- [23] LaFehr, T.R. (1991). Una solución exacta para la corrección de la curvatura de la gravedad; LaFehr, T.R. Standardization in gravity reduction. Geophysics, 56(8):1170--1178, (1991).
- [24] Leberl, F.W. (1990). Radargrammetric Image. Processing, Artech House, Massachusetts.
- [25] Lira, J. (2009). Introducción a la percepción remota. Instituto de Geofísica. Universidad Nacional Autónoma de México, IPN-UNAM-FCE.
- [26] Mather, P and Tso, B. (2009). Classification Methods for Remotely Sensed Data (2nd ed.). CRC Press. pp. 37–38.
- [27] Massonet, D. and Rabaute, T. (1993). "Radar Interferometry: Limits and Potential", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 31, no. 2, pp. 455-464, March.

- [28] NASA, (2005a), Shuttle Radar Topography Mission: Instruments. <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/instr.htm> (Version 06 August 2008).
- [29] Nagy D., (1966). The Prism Method for Terrain Corrections Using Digital Computers. *Pure Appl. Geophys.* 63, 31–39. pag 10
- [30] Pierce, L. et al (2006), Evaluation of the Horizontal Resolution of SRTM Elevation Data: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 72, no. 11, p 1235 - 1244.
- [31] Proyecto de Investigación Geológica e Hidrogeológica en la región central del departamento de Santander –INGEOMINAS-. Memoria explicativa de la investigación geológica e hidrogeológica en la zona Guanentina; Memoria explicativa de la investigación geológica e hidrogeológica en el macizo de Santander-Bucaramanga, abril de (2007). Estudio gravimétrico regional en las zonas de exploración hidrogeológica de la parte central del departamento de Santander, octubre de (2008).
- [32] Polidori, L. (1992). Aptitudes et limitations de radar à ouverture synthétique pour la cartographie". *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection*, (125): 41-49.
- [32] Renno, C. D. et al (2008) HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia: *Remote Sensing of Environment*, doi:10.1016/j.rse.2008.03.018
- [33] RESTEC -Remote Sensing Technology Center of Japan- (2008). ALOS Products and Services. http://www.alos-restec.jp/products_e.html#dsm (Version 19 August 2008).
- [34] Rodríguez V., G. (2005). Estudios sobre geoides terrestres y marinos. España: Universidad Complutense de Madrid, p 11
- [35] Sheriff, R.E. (1984) *Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics* 2nd Edition, p141
- [36] Smith, B., and Sandwell, D. (2003) Accuracy and resolution of shuttle radar topography mission data: *Geophysical Research Letters*, v. 30, no. 9, p. 1467.
- [35] Torge, W. (1983) *Geodesia*. México: Editorial Diana; Torge, W. (1989). *Gravimetry*. Walter de Gruyter, Berlin. Torge, W et al (1992). Introduction of absolute gravimetric techniques into a high-precision gravity and vertical control system in northern Iceland. Deutsche Geodätische Kommission; Torge, W. (2001). *Geodesy*. New York, W. de Gruyter.
- [37] USGS (2008), HydroSHEDS: Data layers and availability: <http://hydrosheds.cr.usgs.gov/hydro.php> (version 06 August 2008).
- [38] Ulaby , F. T., et al (1986b) Textural information in SAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 24, 235–245.

[39] Valeriano, M. et al (2005) Modeling small watersheds in Brazilian Amazonia with shuttle radar topographic mission-90 m data: Computers and Geosciences, v. 32, p. 1169 - 1181.

[40] Walker, W. S et al (2007) Quality assessment of SRTM C- and X-band interferometric data: Implications for the retrieval of vegetation canopy height: Remote Sensing of Environment, v 106, p. 428 - 448

[41] Zakatov, P. S. (1997). Curso de Geodesia Superior. Editorial Mir-Rubiños 1860.

[42] Zamperoni, P. (1995). "Image Enhancement". In Peter W. Hawkes, Benjamin Kazan, and Tom Mulvey. Advances in imaging and electron physics. 92. Academic Press. pp. 13.